

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL
MECÁNICA
PROYECTO FIN DE CARRERA

MONTAJE Y ESTUDIO DE UN
AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO
EN LA SUSPENSIÓN DE UN VEHÍCULO
AUTOMÓVIL

Autor: Diego Coronel Benavente

Tutora: Dra. D^a. M^a Jesús Lopez Boada

Julio 2010

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fin de carrera simboliza el final de una dura aunque gratificante etapa de la que recuerdo muchos momentos felices y satisfactorios. La finalización de este proyecto no hubiese sido posible sin la generosa colaboración de todas y cada una de las personas que cito a continuación.

En primer lugar he de dar las gracias a María Jesús, mi tutora, por todo el tiempo dedicado y la ayuda mostrada desinteresadamente.

Gracias a mi padre, que me ha inculcado los valores del esfuerzo y de la constancia, ya que sin ellos no habría llegado nunca hasta aquí. Agradecido también a mi madre, que ha sabido apoyarme en todos y cada uno de los momentos que lo he necesitado, comportándose siempre como la mejor madre que podría esperar.

Me acuerdo también de mis hermanos, Jesús y Dani, y de mis cuñadas, Yoly y Belén, por servirme de ejemplo y de referencia a lo largo de toda mi vida.

Gracias también a Javier y a Tere, por el especial afecto mostrado. Estoy enormemente agradecido por toda la confianza depositada en mí durante todos estos años.

Mi más sincero agradecimiento a Javi y a Hania, ya que sin su enorme ayuda no hubiese podido terminar este proyecto. Gracias por todas las ideas, explicaciones y apoyo proporcionados durante todo este tiempo.

Gracias a Javi, Mesa, Tito, Kevin, David y Javito, por compartir tantas cosas en estos años, y, principalmente agradecido por el hecho de enseñarme que en la universidad se pueden obtener, además de los conocimientos pertinentes, valores tan importantes como la amistad y la convivencia del día a día.

Una especial mención se merece mi abuelo Feliciano, ya que espero que esté tan orgulloso de mí como yo lo estoy de él.

Y, ante todo, gracias a Sara, porque sin ella nada de esto hubiese sido posible. Gracias por el apoyo mostrado en los momentos más duros y difíciles, por iluminar con una simple sonrisa los momentos más oscuros de mi vida. Gracias por toda esa confianza incondicional mostrada y por querer ser mi compañera durante todo este camino.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos del proyecto	2
1.3. Organización del proyecto	3
CAPÍTULO 2. SISTEMA DE SUSPENSIÓN.....	5
2.1. El sistema de suspensión.....	5
2.1.1. Movimientos de la carrocería	6
2.2. Elementos de un sistema de suspensión	7
2.2.1. Características de un suspensión	7
2.2.2. Elementos elásticos.....	8
2.2.3. Elementos de amortiguación	12
2.2.4. Elementos constructivos	16
2.2.5. Elementos de mejora	16
2.3. Clasificación de las suspensiones	18
2.4.1. Clasificación según la geometría	18
2.4.2. Clasificación por el sistema de control.....	30
CAPÍTULO 3. FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS	35
3.1. Introducción	35
3.1.1. Propiedades reológicas	36
3.1.2. Posibles aplicaciones de la Reología	38
3.2. Los materiales inteligentes.....	39
3.2.1. Materiales con memoria de forma	40
3.2.2. Materiales piezoeléctricos y electrostrictivos.....	41
3.2.3. Materiales foto y cromóactivos	42
3.3. Fluidos reológicos.....	43
3.3.1. Fluidos magneto-reológicos	45
3.4. Aplicaciones actuales	46
3.4.1. Suspensión de asientos para vehículos de trabajo pesado.....	47
3.4.2. Amortiguadores de vibración industriales	47
3.4.3. Control de vibración sísmica en estructuras	48
3.4.4. Freno rotativo magnetorreológico.....	50

3.4.5. Prótesis médicas.....	51
3.5. Amortiguadores magneto-reológicos para suspensiones vehiculares	52
3.5.1. Ventajas e inconvenientes	54
CAPÍTULO 4. ADAPTACIÓN DE UN AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO RD-1005.3 A LA SUSPENSIÓN DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL	56
4.1. Introducción	56
4.2. Incorporación de un amortiguador magneto-reológico rd 1005.3 en la suspensión de un automóvil.....	57
4.2.3. Diseño y montaje de elementos auxiliares para el montaje	58
4.3. Instalación del amortiguador magneto-reológico en la suspensión del vehículo automóvil	62
4.4. Calibración e Instalación de los sensores de desplazamiento	67
4.4.1. Descripción de los sensores de desplazamiento utilizados	67
4.4.2. Calibración de los sensores de desplazamiento.....	69
4.4.3. Colocación de los sensores de desplazamiento	72
CAPÍTULO 5.IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE LABVIEW.....	74
5.1. Introducción	74
5.1.1. Equipamiento utilizado	76
5.2. LabVIEW SignalExpress 2009.....	78
CAPÍTULO 6. DESARROLLO PRÁCTICO Y RESULTADOS EXPERIMENTALES	81
6.1. Introducción	81
6.2. Alimentación de los equipos dentro del vehículo	82
6.3. Conexión entre equipos	83
6.4. Ubicación de los equipos en el vehículo	85
6.5. Descripción de los ensayos realizados	87
6.6.1. Ensayos realizados sobre terreno adoquinado	87
6.6.1. Ensayos realizados sobre escalón	88
6.6.1. Ensayos realizados sobre badén	89
6.6. Resultados experimentales	90
6.6.1. Resultados experimentales sobre adoquinado a 20 km/h	92
6.6.2. Resultados experimentales sobre adoquinado a 30 km/h	99
6.6.3. Resultados experimentales sobre adoquinado a 40 km/h	106
6.6.4. Resultados experimentales sobre escalón	113
6.6.4. Resultados experimentales sobre badén	120

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS	127
7.1. Conclusiones.....	127
7.2. Futuros desarrollos.....	130
ANEXO A. ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS	131
A.1. Introducción	131
A.2. Característicasdel amortiguador RD-1000 de Lord	131
A.3. Especificaciones de los equipos de National Instruments	135
A.3.1. Especificaiones de NI PXI 1031DC	135
A.3.2. Especificaiones de NI PXI 4472B.....	137
A.3.3. Especificaiones de NI PXI 6230.....	138
ANEXO B. PLANOS DE PIEZAS DISEÑADAS.....	139
B.1. Introducción	139
B.2. Plano de soporte superior.....	140
B.3. Plano de bulón pasante.....	141
B.1. Plano de macho roscado	142
B.2. Plano de casquillo inferior.....	143
REFERENCIAS.....	144

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1.1. Peugeot 207 3 puertas	2
Figura 2.1. Movimientos en el vehículo	6
Figura 2.2. Influencia de la dureza del muelle en las oscilaciones.....	7
Figura 2.3. Elementos de ballesta	9
Figura 2.4. Montaje de una suspensión por ballesta	9
Figura 2.5. Características de un muelle	10
Figura 2.6. Diferentes muelles helicoidales	10
Figura 2.7. Esquema de una barra de torsión	11
Figura 2.8. Disposición y montaje de las barras de torsión.	11
Figura 2.9. Amortiguador de fricción	12
Figura 2.10. Flujo de aceite a través del peso permanente	14
Figura 2.11. Flujo de aceite a través de las válvulas de apertura por presión	14
Figura 2.12. Esquema simplificado de un amortiguador bitubo.....	14
Figura 2.13. Esquema simplificado de un amortiguador monotubo	15
Figura 2.14. Ejemplo de casquillo en una suspensión delantera tipo McPherson	16
Figura 2.15. Barra estabilizadora transversal.....	17
Figura 2.16. Figura esquemática de una suspensión rígida	18
Figura 2.17. Esquema simplificado de una suspensión trasera de eje rígido	19
Figura 2.18. Esquema simplificado de una suspensión semirrígida con “eje de Dion”	20
Figura 2.19. Suspensión trasera semirrígida de eje torsional	21
Figura 2.20. Esquema simplificado de una suspensión independiente de tipo McPherson	22
Figura 2.21. Suspensión independiente de eje oscilante.....	23
Figura 2.22. Suspensión clásica de brazos arrastrados	24
Figura 2.23. Suspensión McPherson de un Alfa Romeo 147	25
Figura 2.24. Suspensión de paralelogramo deformable de Mercedes Benz	26
Figura 2.25. Suspensión multibrazo del eje delantero de un Audi A6	27
Figura 2.26. Suspensión multibrazo en el eje trasero	27
Figura 2.27. Funcionamiento del sistema de suspensión Hidroneumático	28
Figura 2.28. Elementos del sistema Hidractiva de Citroën montado en un C5	29

Figura 2.29. Componentes de la suspensión neumática de una Audi A8	30
Figura 2.30. Esquema de una suspensión pasiva	31
Figura 2.31. Esquema de una suspensión activa.....	32
Figura 2.32. Esquema de una suspensión semiactiva	33
Figura 2.33. Sistema <i>Four-C</i> del Volvo S60 R.....	34
Figura 3.1. Esfuerzo de corte en función de la densidad de flujo	37
Figura 3.2. Viscosidad como función de la velocidad de corte	37
Figura 3.3. Representación simplificada del efecto de forma	40
Figura 3.4. Cambio de estructura cristalina en aleaciones con memoria de forma	41
Figura 3.5. Gráfica que relaciona el esfuerzo viscoso con la velocidad de deformación.....	44
Figura 3.6. Campo de velocidades en un fluido magnético	46
Figura 3.7. Amortiguador de fluido magneto-reológico Rheonetic RD-1001-4	47
Figura 3.8. Amortiguador de vibraciones “Rheonetic” RD-1013-1	48
Figura 3.9. Disposición de amortiguadores magneto-reológicos en lavadora	48
Figura 3.10. Amortiguador sísmico de fluido magneto-reológico Rheonetic MRD-9000.....	49
Figura 3.11. Amortiguador magneto-reológico en un edificio.....	49
Figura 3.12. Amortiguador magneto-reológico en un puente	50
Figura 3.13. Esquema de un freno magneto-reológico.....	50
Figura 3.14. Prótesis con amortiguador magneto-reológico	51
Figura 3.15. Estructura de un amortiguador magneto-reológico	52
Figura 3.16. Audi R8 equipado en el sistema <i>Magnetic Ride</i> de Delphi	54
Figura 3.17. Elementos de la amortiguación magneto-reológica en una Audi R8.....	55
Figura 4.1. Amortiguador magneto-reológico Rd-1005.3	57
Figura 4.2. Carcasa de un amortiguador Bilstein	57
Figura 4.3. Soporte fabricado para amortiguador magneto-reológico.....	59
Figura 4.4. Macho roscado fabricado para amortiguador magneto-reológico.....	60
Figura 4.5. Bulón fabricado para amortiguador magneto-reológico	60
Figura 4.6. Conjunto amortiguador – elemento de unión superior.....	60
Figura 4.7. Base del amortiguador BILSTEIN	61
Figura 4.8. Casquillo fabricado para amortiguador magneto-reológico	61
Figura 4.9. Montaje final del amortiguador magneto-reológico	62

Figura 4.10. Conjunto amortiguador sin pinza de freno	63
Figura 4.11. Extracción completa del conjunto amortiguador	64
Figura 4.12. Amortiguador magneto-reológico montado en la suspensión delantera derecha. 66	
Figura 4.13. Sensor de desplazamiento LVDT MTN / E	67
Figura 4.14. Sensor de desplazamiento LVDT MTN / E	68
Figura 4.15. Linealidad sensor delantero derecho	70
Figura 4.16. Linealidad sensor delantero izquierdo	71
Figura 4.17. Sensor de la suspensión derecha	72
Figura 4.18. Sensor de la suspensión izquierda	72
Figura 4.19. Sujeción inferior sensor	73
Figura 4.20. Sujeción superior sensor	73
Figura 5.1. Reportes interactivos creados en LabVIEW SignalExpress	75
Figura 5.2. Chasis NI PXI 1031DC	76
Figura 5.3. Módulo NI PXI 4472B	77
Figura 5.4. Módulo NI PXI 6230	77
Figura 5.5. Espacio de trabajo de LabVIEW SignalExpress 2009	78
Figura 5.6. Submenú de la pestaña <i>Add Step</i> de LabVIEW SignalExpress 2009	79
Figura 5.7. Ejemplo de adquisición de señal en LabVIEW SignalExpress 2009	80
Figura 5.8. Ejemplo de almacenamiento de la señal en LabVIEW SignalExpress 2009	80
Figura 6.1. Conexiones realizadas en PXI 6230	82
Figura 6.2. Esquema de ensayos sobre badén	84
Figura 6.3. Ubicación del equipo controlador PXI	85
Figura 6.4. Ubicación del regulador de tensión del amortiguador magneto-reológico	86
Figura 6.5. Ubicación de la pantalla, el teclado y el ratón en el vehículo	86
Figura 6.6. Ensayo sobre terreno adoquinado	87
Figura 6.7. Esquema de ensayos sobre terreno adoquinado	88
Figura 6.8. Ensayo sobre escalón	88
Figura 6.9. Esquema de ensayos sobre escalón	89
Figura 6.10. Ensayo sobre badén	89
Figura 6.11. Esquema de ensayos sobre badén	90
Figura 6.12. <i>Power Spectral Density</i> genérico con ruido a altas frecuencias	91

Figura 6.13. Filtro <i>Butterflow</i> escogido para eliminar el ruido generado.....	91
Figura 6.14. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 0 V.....	93
Figura 6.15. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 0 V	93
Figura 6.16. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 2.5 V...	94
Figura 6.17. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 2.5 V	94
Figura 6.18. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 5 V.....	95
Figura 6.19. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 5 V	95
Figura 6.20. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 7.5 V...	96
Figura 6.21. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 7.5 V	96
Figura 6.22. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 10 V....	97
Figura 6.23. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 10 V	97
Figura 6.24. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 0 V...	100
Figura 6.25. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 0 V	100
Figura 6.26. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 2.5 V	101
Figura 6.27. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 2.5 V	101
Figura 6.28. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 5 V...	102
Figura 6.29. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 5 V	102
Figura 6.30. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 7.5 V	103
Figura 6.31. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 7.5 V	103
Figura 6.32. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 10 V.	104
Figura 6.33. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 10 V	104
Figura 6.34. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 0 V...	107
Figura 6.35. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 0 V	107
Figura 6.36. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 2.5 V.	108
Figura 6.37. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 2.5 V	108
Figura 6.38. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 5 V...	109
Figura 6.39. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 5 V	109
Figura 6.40. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 7.5 V	110
Figura 6.41. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 7.5 V	110
Figura 6.42. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 10 V.	111
Figura 6.43. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 10 V	111

Figura 6.44. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre escalón a 0 V.....	114
Figura 6.45. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre escalón a 0 V.....	114
Figura 6.46. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre escalón a 2.5 V.....	115
Figura 6.47. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre escalón a 2.5 V.....	115
Figura 6.48. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre escalón a 5 V.....	116
Figura 6.49. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre escalón a 5 V.....	116
Figura 6.50. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre escalón a 7.5 V.....	117
Figura 6.51. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre escalón a 7.5 V.....	117
Figura 6.52. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre escalón a 10 V.....	118
Figura 6.53. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre escalón a 10 V.....	118
Figura 6.54. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre badén a 0 V.....	121
Figura 6.55. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre badén a 0 V.....	121
Figura 6.56. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre badén a 2.5 V.....	122
Figura 6.57. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre badén a 2.5 V.....	122
Figura 6.58. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre badén a 5 V.....	123
Figura 6.59. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre badén a 5 V.....	123
Figura 6.60. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre badén a 7.5 V.....	124
Figura 6.61. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre badén a 7.5 V.....	124
Figura 6.62. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre badén a 10 V.....	125
Figura 6.63. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre badén a 10 V.....	125
Figura A.1. Gráfica Fuerza vs Velocidad del amortiguador RD-1005.3	133
Figura A.2. Medidas del amortiguador magneto-reológico.....	134

ÍNDICE TABLAS

Tabla 4.1. Relación de la longitud con la carrera del sensor de desplazamiento LVDT	68
Tabla 4.2. Relación Voltaje/desplazamiento de datos del sensor delantero derecho	70
Tabla 4.3. Relación Voltaje/desplazamiento de datos del sensor delantero izquierdo.....	71
Tabla 6.1. Datos RMS amortiguador magneto-reológico para adoquinado a 20 km/h.....	98
Tabla 6.2. Datos RMS amortiguador convencional para adoquinado a 20 km/h	98
Tabla 6.3. Datos RMS amortiguador magneto-reológico para adoquinado a 30 km/h.....	105
Tabla 6.4. Datos RMS amortiguador convencional para adoquinado a 30 km/h	105
Tabla 6.5. Datos RMS amortiguador magneto-reológico para adoquinado a 40 km/h.....	112
Tabla 6.6. Datos RMS amortiguador convencional para adoquinado a 40 km/h	112
Tabla 6.7. Datos RMS amortiguador magneto-reológico para escalón	119
Tabla 6.8. Datos RMS amortiguador convencional para escalón	119
Tabla 6.9. Datos RMS amortiguador magneto-reológico para badén	126
Tabla 6.10. Datos RMS amortiguador convencional para badén.....	126
Tabla A.1. Características del amortiguador RD-1000 de Lord	132

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Desde que a finales del siglo XIX surgieran los primeros vehículos con motor de gasolina, la ciencia automovilística ha experimentado una constante evolución hasta nuestros días. Dicha evolución se ha centrado en parámetros tan importantes como la aerodinámica, el motor del vehículo, la seguridad, el confort de los pasajeros, etc.

El sistema de suspensión es uno de los elementos más importantes del vehículo, debido a que de él dependen la seguridad y el confort de los pasajeros. Debido a dicha importancia, los fabricantes de vehículos automóviles han realizado grandes inversiones en este ámbito.

Las suspensiones reológicas actualmente se caracterizan por ser un campo novedoso y moderno, cuya inversión y evolución han experimentado un gran crecimiento en las últimas décadas.

Por estos motivos, se ha desarrollado el presente Proyecto Fin de Carrera que, mediante el diseño y fabricación de un prototipo de amortiguador magneto-reológico, pretende investigar las suspensiones semiactivas, ya que estas permiten una mejora de las prestaciones dinámicas del vehículo y un mayor confort para los pasajeros.

1.2 OBJETIVO DEL PROYECTO

El principal objetivo del presente proyecto es el montaje y estudio del amortiguador magneto-reológico Rd-1005.3 de la empresa Lord. Las especificaciones de dicho amortiguador se encuentran en el Anexo A.2. El amortiguador a estudiar se implantará en la suspensión delantera derecha de un Peugeot 207. El estudio de este proyecto es común con el de David López Fernández, ambos realizados para el área de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid. En la figura 1.1 se muestra un Peugeot 207 de tres puertas.



Figura 1.1. Peugeot 207 3 puertas

El amortiguador Rd 1005.3 utilizado para la realización de dicho proyecto, es un amortiguador magneto-reológico fabricado para la suspensión de los asientos de vehículos de gran tonelaje. Debido a este motivo, se han tenido que diseñar y fabricar diversas piezas para adaptar dicho amortiguador a la suspensión delantera del vehículo., y así poder realizar la toma de datos correctamente.

1.3 ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO

El presente proyecto consta de nueve capítulos, siendo el primero de ellos la presente introducción.

En el capítulo segundo, SISTEMA DE SUSPENSIÓN, se describe la evolución que ha sufrido el sistema de suspensión a lo largo de la historia, además de sus características y funciones principales. A su vez, se explican brevemente los principales elementos que lo componen. Por último, se realiza una clasificación del sistema de suspensión.

En el capítulo tercero, FLUIDOS MAGNETEORREOLÓGICOS, se realiza una breve introducción a los fluidos reológicos y materiales inteligentes. Además, el presente proyecto se centra en los amortiguadores que portan fluidos magneto-reológicos, explicando brevemente sus aplicaciones actuales, así como sus ventajas e inconvenientes.

En el capítulo cuarto, ADAPTACIÓN DE UN AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO RD-1005.3 A LA SUSPENSIÓN DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL, se explican las operaciones necesarias para la adaptación del vehículo, tales como la calibración y posterior instalación de los sensores empleados para captar datos durante el ensayo, o la adaptación e instalación del amortiguador magneto-reológico a estudiar.

En el capítulo quinto, IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE LABVIEW, se realiza una breve introducción explicando las principales características del software utilizado para el gobierno de la captación de datos durante el ensayo, así como el equipo utilizado. Además se adjunta un pequeño tutorial de dicho software explicando el procedimiento empleado en los ensayos.

En el capítulo sexto, DESARROLLO PRÁCTICO Y RESULTADOS EXPERIMENTALES, se adjuntan los datos adquiridos en los ensayos realizados, así como su posterior procesamiento. Además de una breve explicación de la diferente colocación y alimentación de todos los equipos dentro del vehículo.

En el capítulo séptimo, CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS, se exponen las conclusiones obtenidas del procesamiento de los datos adquiridos en los ensayos. A su vez, se proponen diferentes estudios que tengan como punto de partida los estudios realizados en este proyecto.

En el anexo A, ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS, se adjuntan las especificaciones tanto del amortiguador magneto-reológico empleado como de todos y cada uno los equipos utilizados para la toma de datos.

En el anexo B, PLANOS DE PIEZAS DISEÑADAS, se adjuntan los planos de todas las piezas que han sido necesarias para la adaptación del amortiguador magneto-reológico.

CAPÍTULO 2

SISTEMA DE SUSPENSIÓN

2.1 INTRODUCCIÓN

El sistema de suspensión de un automóvil es el conjunto de elementos que actúan entre los órganos no suspendidos, siendo estos ejes y ruedas, y órganos suspendidos, como el bastidor, carrocería y pasajeros [1, 2].

La principal misión de la suspensión es absorber las posibles irregularidades del terreno, ayudando así a favorecer la comodidad del conductor y de los pasajeros, al mismo tiempo que asegura la estabilidad y direccionalidad del vehículo manteniendo el contacto entre neumático y calzada ya que, las fuerzas de interacción entre éstos son las únicas que permiten el control del vehículo. En el caso de que se produjera una reducción de dicho contacto, disminuiría también la capacidad de controlar el vehículo y por tanto la seguridad. Además de las funciones anteriores, el sistema de suspensión debe cumplir otras funciones complementarias como [3]:

- Transmitir las fuerzas de aceleración y de frenada entre los ejes y bastidor.
- Resistir el par motor y de frenada, así como los efectos de las curvas.
- Conservar el ángulo de dirección en todo el recorrido, el paralelismo entre ejes y la perpendicularidad del bastidor.
- Aguantar la carga del vehículo.

2.1.1 MOVIMIENTOS DE LA CARROCERÍA

Cuando un automóvil sufre un golpe en una rueda debido a un resalte o un hoyo, este golpe se transmite por medio de los ejes al chasis produciéndose oscilaciones en el propio vehículo. También una mala conducción o un reparto desequilibrado de carga pueden producir oscilaciones [3].

Los movimientos de la carrocería se generan en el centro de gravedad del coche y se propagan en distintos sentidos. En la figura 2.1, se puede observar que se producen tres tipos de movimientos: empuje, cabeceo y balanceo. El empuje se produce al pasar por un terreno ondulado, el cabeceo es debido a las frenadas bruscas y el balanceo se genera al tomar las curvas a alta velocidad.

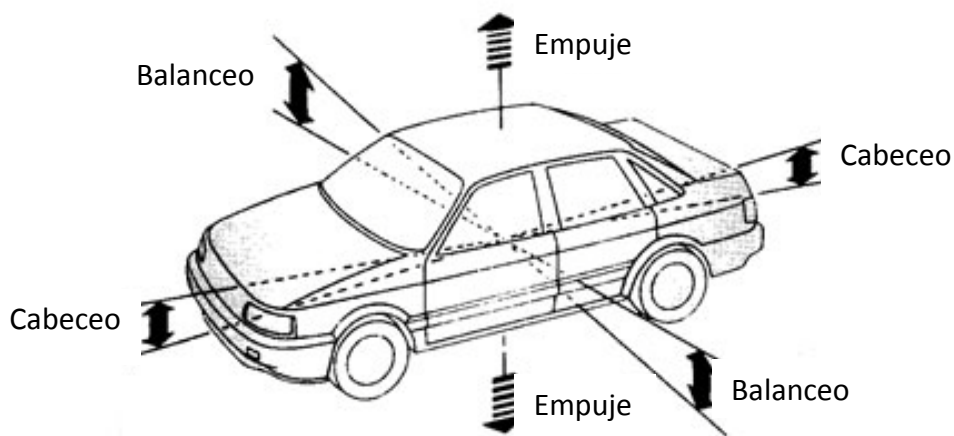


Figura 2.1. Movimientos en el vehículo

En el movimiento de la carrocería influyen diferentes parámetros como:

- El diseño de las suspensiones.
- El tarado de los muelles y amortiguadores.
- Las cotas de batalla y vías delanteras y traseras.
- Reparto de pesos entre los ejes delanteros y traseros.

2.2 ELEMENTOS DE LA SUSPENSIÓN

Los principales elementos del sistema de suspensión están recogidos en cuatro grandes grupos, que se detallan a continuación [1]:

- Conjunto elástico: formado por muelles helicoidales, ballestas o barras de torsión
- Elementos de amortiguación.
- Elementos constructivos: los más importantes son los *silentblocks*, brazos o rótulas.
- Elementos que mejoran el comportamiento de la suspensión, como son las barras estabilizadoras, los tirantes de reacción, etc.

2.1.1 CARACTERÍSTICAS DE UNA SUSPENSIÓN

Dado que los elementos de suspensión han de soportar el peso del vehículo, han de ser lo suficientemente fuertes para que no sufran deformación alguna. A su vez, deben asegurar el permanente contacto de las ruedas con el terreno, por lo que deberán salvar todas las irregularidades que el terreno ofrece. Debido a estas irregularidades, en los elementos de la suspensión se producen una serie de oscilaciones de intensidad decreciente hasta que llegan a la posición de equilibrio de los elementos en cuestión; dichas oscilaciones deben ser correctamente amortiguadas para que no produzca incomodidades a los usuarios del vehículo. En la figura 2.2 se explica la influencia de la dureza del muelle en las oscilaciones, observando la diferencia entre un muelle blando (gran recorrido y pequeño número de oscilaciones) y un muelle duro (menor recorrido y mayor número de oscilaciones).

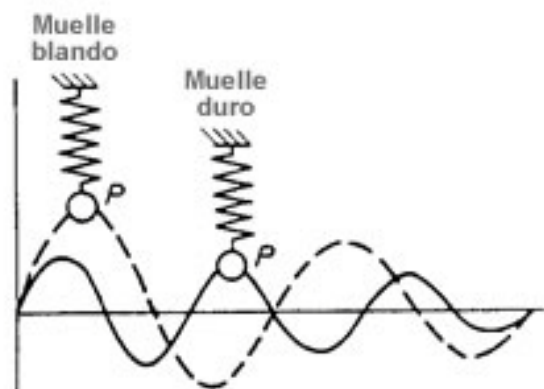


Figura 2.2. Influencia de la dureza del muelle en las oscilaciones

En cuanto a la influencia de la carga del automóvil en la suspensión, al ser la carga variable resulta imposible encontrar una suspensión ideal. Debido a dicha variabilidad, los elementos elásticos se calcularán para que aguanten el máximo peso posible sin perder la elasticidad, aunque esta suspensión no resulte ideal, ya que si se disminuye la carga la suspensión sería excesivamente dura. En el caso contrario, si la suspensión se calculara para un peso mínimo, al aumentar éste la suspensión resultaría blanda.

2.2.2 ELEMENTOS ELÁSTICOS

Las principales funciones que desempeñan los elementos elásticos son, entre otras, mejorar el confort impidiendo que las irregularidades del terreno se transmitan a la carrocería, soportar el peso del vehículo o permitir el desplazamiento relativo entre bastidor y ruedas [3, 4, 5, 6].

Los tres tipos de elementos elásticos más utilizados en la actualidad son: ballestas, muelles helicoidales y barras de torsión.

BALLESTAS

Las ballestas están formadas por un conjunto de láminas de acero resistente y elástico, unidas mediante unas abrazaderas que permiten el deslizamiento entre las láminas cuando estas se deforman por el peso que soportan. La primera y más larga es la lámina maestra, cuyos extremos están curvados formando dos orificios denominados ojos, por los cuales, previo montaje de los casquillos, se une la ballesta al soporte del bastidor, por medio de bulones o pernos. Las láminas posteriores que forman la ballesta van siendo generalmente más pequeñas y curvadas. Por último, las láminas se aprietan y se unen en el centro mediante un perno “capuchino”, que consiste en un tornillo pasante con tuerca. En la figura 2.3 se pueden observar cada uno de los elementos de la ballesta.

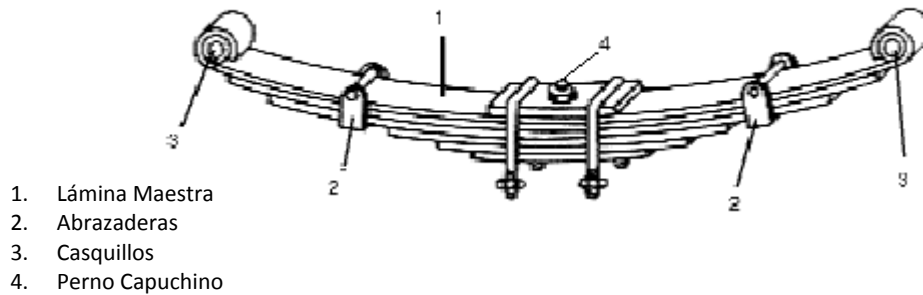


Figura 2.3. Elementos de una ballesta

Debido a la curvatura antes citada que presenta la ballesta, existe la posibilidad de que esta tienda a ponerse recta para absorber las igualdades del terreno. Dicho efecto debe tenerse en cuenta a la hora de la unión al chasis, ya que la ballesta incrementa su longitud de forma considerable. En la figura 2.4 se muestra un tipo de montaje que admite el alargamiento anteriormente mencionado.



Figura 2.4. Montaje de una suspensión por ballesta

En cuanto a las ventajas que presentan las ballestas, cabe destacar algunas como su correcto funcionamiento aunque disponga de una lámina rota, su rigidez transversal y longitudinal o su posibilidad de soportar grandes pesos.

MUELLES HELICOIDALES

Los muelles helicoidales consisten en un arrollamiento en hélice de un cable de acero elástico. La flexibilidad del muelle está en función del diámetro de la varilla utilizada, del número de espiras, del ángulo de inclinación de las mismas, del diámetro del muelle y de la calidad del acero empleado para su construcción. En la figura 2.5 se observan las características de un muelle convencional.

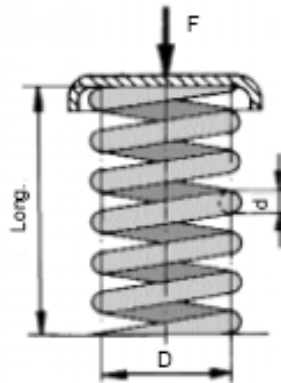


Figura 2.5. Características de un muelle

Variando sus características constructivas, se puede conseguir que la suspensión se comporte de maneras diferentes. Por ejemplo, mediante el paso variable, la forma cónica o el empleo de cable de diámetro variable se puede obtener una rigidez progresiva (véase figura 2.6).

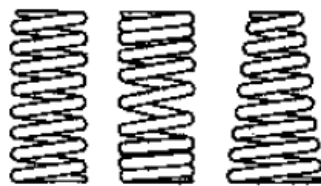


Figura 2.6. Diferentes muelles helicoidales

Las ventajas de los muelles helicoidales son algunas como su innecesario mantenimiento, su protección ante la corrosión y su poco peso. Actualmente, los muelles helicoidales son los elementos elásticos más utilizados en suspensiones independientes.

BARRAS DE TORSIÓN

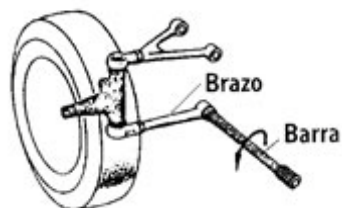
Las barras de torsión se basan en el principio de que si a una varilla de acero elástico sujeta por uno de sus extremos se le aplica por el otro un esfuerzo de torsión, esta varilla tenderá a retorcerse, volviendo a su forma primitiva por su elasticidad cuando cesa el esfuerzo de torsión. La figura 2.7 muestra esquemáticamente una barra de torsión.



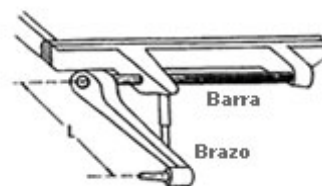
Figura 2.7. Esquema de una barra de torsión

El montaje de estas barras sobre el vehículo se realiza (ver figura 2.8) fijando uno de sus extremos al chasis o carrocería, de forma que no pueda girar en su soporte, y en el otro extremo se coloca una palanca solidaria a la barra unida en su extremo libre al eje de la rueda. Cuando esta suba o baje por efecto de las desigualdades del terreno, se producirá en la barra un esfuerzo de torsión cuya deformación elástica permite el movimiento de la rueda.

Las barras de torsión se pueden disponer paralelamente al eje longitudinal del bastidor o también transversalmente a lo largo del bastidor.



Montaje longitudinal



Montaje transversal

Figura 2.8. Disposición y montaje de las barras de torsión.

2.2.3 ELEMENTOS DE AMORTIGUACIÓN

Los elementos elásticos descritos en el apartado anterior, al deformarse vuelven a su posición inicial experimentando una serie de oscilaciones de amplitud decreciente. Los elementos de amortiguación son los encargados de frenar el número de oscilaciones, su amplitud y la frecuencia entre estas, producidos por los elementos elásticos [5].

Los amortiguadores que se detallarán a continuación son los de fricción, el telescópico que engloba al amortiguador monotubo y al bitubo.

AMORTIGUADORES DE FRICCIÓN

Los amortiguadores de fricción, que se usan muy poco en la actualidad, basan su funcionamiento en la disipación de la energía en calor que se produce con el rozamiento de discos de fricción. Están compuestos por dos brazos formados por dos o más discos de acero que se reúnen alternados en un eje común. Uno de los dos brazos se enlaza a la rueda y el otro al bastidor, de manera que con las oscilaciones del elemento elástico se pueda producir el frotamiento entre los discos que genera la acción de frenado. La figura 2.9 muestra un amortiguador de fricción común [4].

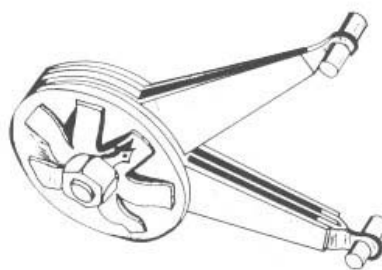


Figura 2.9. Amortiguador de fricción

Los inconvenientes que presentan los amortiguadores de fricción frente a los amortiguadores hidráulicos actuales son:

- Una vez superada la fuerza de fricción que ejercen estos amortiguadores, la fuerza amortiguadora disminuye en vez de aumentar con la velocidad, como sería deseable.
- Su comportamiento se altera con el desgaste.
- Es necesario reponer las piezas desgastadas periódicamente.

AMORTIGUADOR TELESCÓPICO

Actualmente y desde hace unos años atrás, se ha impuesto en la industria el uso de los amortiguadores telescópicos. En estos, la fuerza amortiguadora es función creciente con la velocidad [7].

Básicamente, los amortiguadores telescópicos constan de un pistón que trabaja dentro de un cilindro en el que hay aceite. Sobre el pistón existen una serie de orificios y unas válvulas precomprimidas que permiten el paso de aceite de una parte a otra del pistón cuando la presión supera un valor dado. Los orificios representan el paso permanente y las válvulas el paso de apertura por presión respectivamente. El paso permanente vienen a ser orificios fijos que restringen el flujo del caudal. En el caso de las válvulas de apertura por presión, para que estas se abran es necesario ejercer sobre ellas una determinada presión y a medida que ésta aumenta la presión va siendo mayor. Dentro de los amortiguadores telescópicos, podemos encontrar los amortiguadores bitubo y monotubo. Las figuras 2.10 y 2.11 muestran los dos tipos de flujo de aceite explicado anteriormente.



Figura 2.10. Flujo de aceite a través del peso permanente

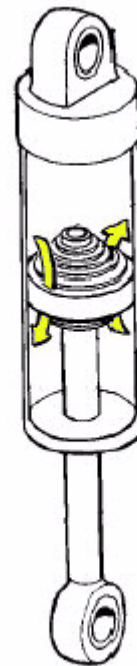


Figura 2.11. Flujo de aceite a través de las válvulas de apertura por presión

- **Amortiguadores bitubo y monotubo**

Los amortiguadores bitubo son los más utilizados en la actualidad. Constan de dos cámaras, una interior y otra de reserva (ver figura 2.12). Contienen válvulas situadas en el pistón y en la base del amortiguador, siendo esta última la llamada válvula de pie. Los amortiguadores de doble tubo se dividen a su vez en dos tipos, los no presurizados (utilizan aceite), y los presurizados (con aceite y gas).

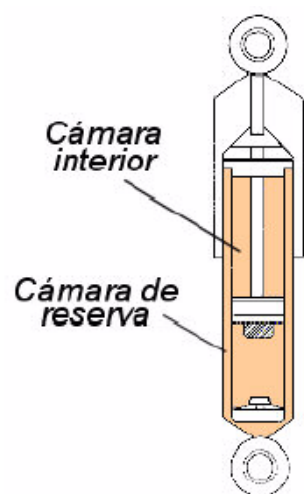


Figura 2.12. Esquema simplificado de un amortiguador bitubo

Los amortiguadores monotubo [7], también conocidos como amortiguadores de gas, están adquiriendo cada vez más importancia sobre todo en vehículos de altas prestaciones y en competición. Este amortiguador consta de dos cámaras principales, una contiene el aceite y la otra gas a presión (normalmente nitrógeno) que están separadas por un pistón flotante (véase figura 2.13).

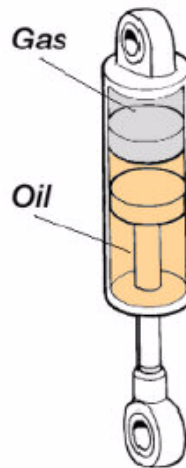


Figura 2.13. Esquema simplificado de un amortiguador monotubo

A continuación se realizará una breve comparación entre estos dos tipos de amortiguadores:

- Los amortiguadores monotubo presentan una mejor refrigeración que los bitubo debido a que la cámara está en contacto directo con el aire.
- Los amortiguadores monotubo constan de un mayor diámetro de pistón, lo que permite reducir las presiones de operación.
- Debido a que los amortiguadores monotubo contienen un pistón separador, no queda restringida la posición de montaje.
- Los amortiguadores monotubo presentan frente a los bitubo mayores costos derivados de requerimientos superiores de precisión, tolerancias de fabricación y estanqueidad del gas.
- La valvulería que presentan los amortiguadores bitubo es más sencilla que la de los monotubo.

- Los monotubo tienen una necesidad mayor de espacio que los amortiguadores bitubo.

2.2.4 ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

CASQUILLOS O *SILENTBLOCKS*

Como ya se ha comentado en el inicio del apartado 2.2, los elementos constructivos más importantes son los denominados casquillos o *silentblocks*, elementos de goma vulcanizada utilizados para unir las suspensiones al chasis, de forma que no existan piezas móviles metálicas en contacto. Los casquillos deben conseguir un buen aislamiento y permitir que las suspensiones trabajen correctamente. Como ventajas, los casquillos presentan su buen mantenimiento y su notable amortiguación propia, aunque como inconvenientes son sensibles a la temperatura, inclemencias del tiempo, a los productos químicos y al aceite. En la figura 2.14 se pueden observar los casquillos del sistema de suspensión de un Toyota Prius [4].

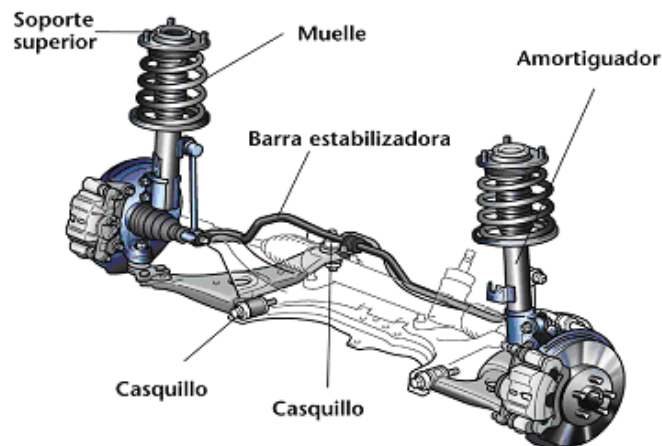


Figura 2.14. Ejemplo de casquillo en una suspensión delantera tipo McPherson

2.2.5 ELEMENTOS DE MEJORA

BARRAS ESTABILIZADORAS

Las barras estabilizadoras son barras redondas de acero generalmente curvadas en forma de U. Estas barras pueden ser de dos tipos, transversales o longitudinales. A continuación, se explicará cada uno de los dos tipos [4]:

- Barras estabilizadoras transversales (figura 2.15). También son conocidas como barras antibalanceo, y, como su propio nombre indica, son utilizadas para evitar las posibles oscilaciones laterales (balanceos). Por ejemplo, estas barras trabajan oponiendo su resistencia a torsión frente al balanceo que un vehículo experimenta en el momento de tomar una curva.



Figura 2.15. Barra estabilizadora transversal

- Barra estabilizadora longitudinal. Su misión es regular los desplazamientos originados entre la masa suspendida y no suspendida ante diferentes esfuerzos.

2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

La clasificación de los sistemas de suspensión se puede llevar a cabo atendiendo a muchos criterios, como pueden ser la clasificación según la geometría, según los componentes del sistema de amortiguación, según el elemento amortiguador o según el sistema de control [8].

En este proyecto, se seguirá una clasificación de los sistemas de suspensión haciendo referencia a dos tipos de clasificaciones. La primera de ellas será la clasificación según la geometría del sistema de suspensión, y la segunda tendrá en cuenta el sistema de control utilizado.

2.3.1 CLASIFICACIÓN SEGÚN LA GEOMETRÍA

La clasificación según la geometría se centrará en tres grupos bien diferenciados. El primero de ellos recogerá las suspensiones rígidas, el segundo las semirrígidas y el tercero las independientes. A continuación se explicará brevemente cada uno de estos tres grupos [3, 6, 8, 9].

SUSPENSIÓN RÍGIDA

En la suspensión rígida, también conocida como sistema dependiente, las ruedas del mismo eje están unidas por un elemento rígido, siendo este elemento normalmente una barra. Debido a la rigidez de este elemento, todo el movimiento que experimenta una rueda se transmite a la otra del mismo eje. En la figura 2.16 se observa cómo la inclinación de una rueda afecta directamente a la otra rueda del eje. Debido a que el eje va fijado al bastidor, la inclinación del eje se transmite a todo el vehículo.

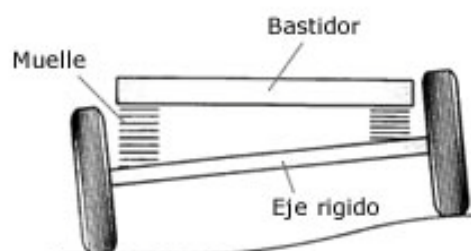


Figura 2.16. Figura esquemática de una suspensión rígida

Las suspensiones rígidas, debido a que ambas ruedas están unidas, presentan el inconveniente de que las vibraciones producidas por la acción de las irregularidades del pavimento se transmiten de un lado al otro del eje. Además, el peso de las masas no suspendidas aumenta notablemente debido al peso del eje rígido y al peso del grupo cónico diferencial en los vehículos de tracción trasera. En estos últimos, el grupo cónico sube y baja en las oscilaciones como una parte integradora del eje rígido. Esto hace que este tipo de amortiguación sea poco cómoda para los pasajeros y presente una menor seguridad.

En cuanto a las ventajas que presentan las suspensiones rígidas, destacan la sencillez de su diseño y la capacidad de no producir variaciones significativas en los parámetros de la rueda como caída o avance. El principal uso de esta disposición de suspensión se realiza sobre todo en vehículos industriales, autobuses, camiones y vehículos todo terreno. En la figura 2.17 se puede ver una representación esquemática de un sistema de suspensión rígida perteneciente al eje trasero de un vehículo con tracción delantera.

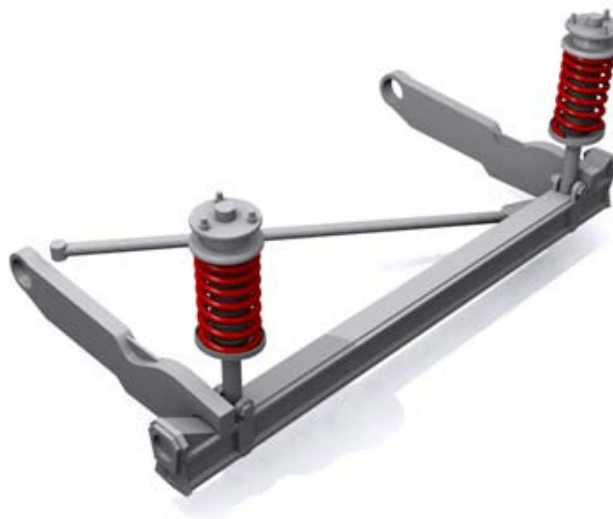


Figura 2.17. Esquema simplificado de una suspensión trasera de eje rígido

SUSPENSIÓN SEMIRRÍGIDA

Las suspensiones semirrígidas se diferencian de las suspensiones rígidas en que, aunque las ruedas están unidas entre sí como en el eje rígido, las oscilaciones que reciben de las irregularidades del terreno se transmiten de forma parcial. En cualquier caso, aunque la suspensión no es rígida total, tampoco es independiente.

Dentro de las suspensiones semirrígidas destacan dos tipos de suspensiones, la suspensión con “eje de Dion” y la suspensión con “eje torsional”.

En el primer tipo de suspensión semirrígida, la suspensión con “eje de Dion”, las ruedas van unidas mediante soportes articulados al grupo diferencial, y como en la suspensión con eje De Dion es parte de la masa suspendida, va anclado al bastidor del automóvil. Bajo este aspecto se transmite el giro a las ruedas a través de dos semiejes (palieres) como en las suspensiones independientes. A su vez, ambas ruedas están unidas entre sí mediante una traviesa o tubo De Dion que las ancla de forma rígida permitiendo a la suspensión deslizamientos longitudinales limitados por unos brazos longitudinales que acompañan a la suspensión. Este sistema tiene la ventaja frente al eje rígido de que se disminuye la masa no suspendida debido al poco peso de la traviesa del eje De Dion. Además, la suspensión posee elementos elásticos de tipo muelle helicoidal. En la actualidad, es muy poca su utilidad debido a su coste elevado. En la figura 2.18 se muestra una suspensión semirrígida con “eje de Dion”.



Figura 2.18. Esquema simplificado de una suspensión semirrígida con “eje de Dion”

El “eje torsional” es otro tipo de suspensión semirrígida, utilizada en las suspensiones traseras en vehículos que tienen tracción delantera. La traviesa o tubo que une las dos ruedas tiene forma de “U”, por lo que es capaz de deformarse un cierto ángulo cuando una de las ruedas encuentra un obstáculo, para después una vez pasado el obstáculo volver a la posición inicial. Las ruedas están unidas rigidamente a dos brazos longitudinales unidos por un travesaño que los une y que se tuerce durante

las sacudidas no simétricas, dando estabilidad al vehículo. Esta configuración da lugar, a causa de la torsión del puente, a una recuperación parcial del ángulo de caída de alto efecto de estabilización, características que junto al bajo peso, al bajo coste y al poco espacio que ocupan, ideal para instalarla junto con otros componentes debajo del piso. Esta configuración hace que este tipo de suspensiones sea una de las más empleadas en vehículos de gama media-baja. En la figura 2.19 se muestra una suspensión semirrígida con “eje torsional”, instalada en un vehículo de tracción delantera.



Figura 2.19. Suspensión trasera semirrígida de eje torsional

SUSPENSIÓN INDEPENDIENTE

En la suspensión independiente las ruedas tienen una suspensión independiente para cada una de ellas. Debido a esta configuración, las oscilaciones no se transmiten de unas a otras. Actualmente, este tipo de suspensión es el único que se utiliza para las ruedas directrices, aunque cada vez se va utilizando más la suspensión independiente a las cuatro ruedas, debido a que es la configuración que ofrece una mejor opción desde el punto de vista del confort y estabilidad al reducir de forma

independiente las oscilaciones generadas por el terreno a cada rueda, sin transmitirse estas a la otra rueda del mismo eje. En la figura 2.20 se muestra un esquema simplificado de una suspensión independiente [3, 6, 8, 9].



Figura 2.20. Esquema simplificado de una suspensión independiente de tipo McPherson

La principal ventaja añadida de la suspensión independiente es que posee menor peso no suspendido que otros tipos de suspensión, por lo que las acciones transmitidas al chasis son de menor magnitud. El diseño de este tipo de suspensión, deberá garantizar que las variaciones de caída de rueda y ancho de ruedas en las ruedas directrices sean pequeñas para conseguir una dirección segura del vehículo.

Como inconvenientes, la suspensión independiente presenta un mayor coste, una mayor complejidad del sistema, además de problemas para cargas elevadas.

Existen varios tipos de suspensión independiente, como por ejemplo la suspensión de eje oscilante, de brazos tirados, McPherson, de paralelogramo deformable y multibrazo, que explicarán a continuación.

- **Suspensión de eje oscilante**

La peculiaridad de la suspensión de eje oscilante es que el elemento de rodadura y el semieje son solidarios (salvo el giro de la rueda), de forma que el conjunto oscila alrededor de una articulación próxima al plano medio longitudinal del vehículo. Es un tipo de suspensión que no puede ser utilizada como eje directriz debido a que en el movimiento oscilatorio de sus semiejes se altera notablemente la caída de las ruedas en las curvas. El sistema de suspensión es completado con dos conjuntos muelle-amortiguador telescópico.

Una variante de este sistema es el realizado mediante un eje oscilante pero de una sola articulación utilizado por Mercedes Benz en sus modelos 220 y 300, como se muestra en la figura 2.21. La ventaja que presenta es que el pivote de giro está a menor altura que en el eje oscilante de dos articulaciones. El mecanismo diferencial oscila con uno de los palieres mientras que el otro se mueve a través de una articulación que permite a su vez un desplazamiento de tipo axial en el árbol de transmisión.

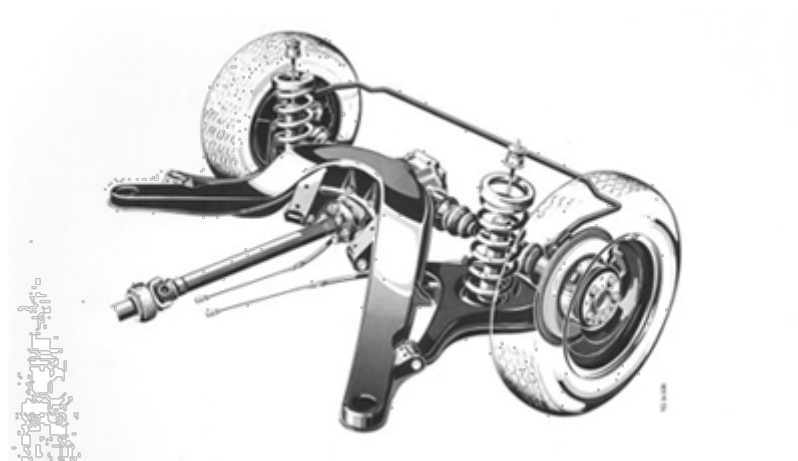


Figura 2.21. Suspensión independiente de eje oscilante

- **Suspensión de brazos tirados o arrastrados**

Esta suspensión se caracteriza por tener dos elementos soporte, también denominados “brazos”, en disposición longitudinal unidos por un lado al bastidor y por

el otro a la rueda. En este tipo de suspensión, las ruedas son tiradas o arrastradas por los elementos longitudinales que pivotan en el anclaje de la carrocería. En la figura 2.22 se presenta una suspensión trasera de brazos tirados.

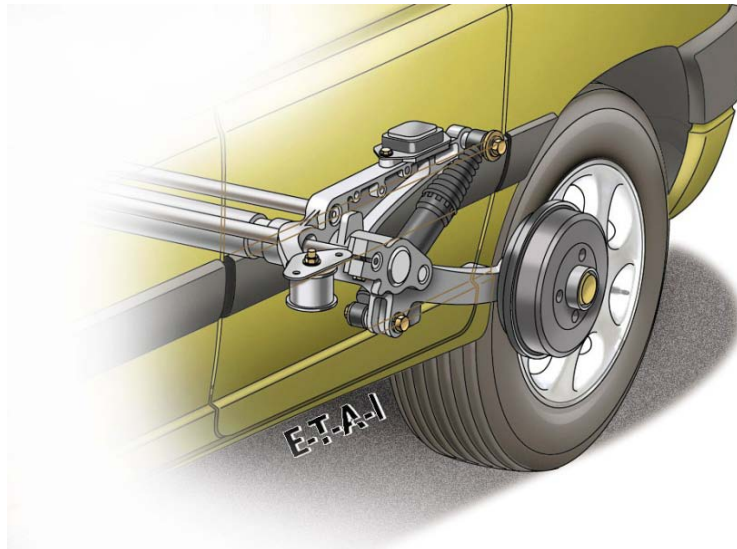


Figura 2.22. Suspensión clásica de brazos arrastrados

Este tipo de suspensión ofrece algunas variantes como la conocida como “brazos semi-arrastrados”, presentando la ventaja de que no precisa estabilizadores longitudinales debido a la componente longitudinal que tiene el propio brazo o soporte. En este caso las variaciones de caída y de vía dependen de la posición e inclinación de los brazos longitudinales por lo tanto, permite que se varíe durante la marcha la caída y el avance de las ruedas con lo que se mejora la estabilidad del vehículo.

- **Suspensión McPherson**

La suspensión McPherson se caracteriza por tener unido solidariamente el amortiguador al buje de la rueda, de manera que el movimiento del bastidor con relación a la rueda tiene la misma dirección que el eje perpendicular del amortiguador.

Este sistema de suspensión, el cual fue desarrollado por Earle S. McPherson, ingeniero de Ford del cual recibe su nombre, es uno de los más utilizados en el tren delantero, aunque también es compatible para el trasero. El éxito de este sistema, sobre todo en vehículos modestos, es debido a su sencillez de fabricación y

mantenimiento, al bajo coste de producción, al poco espacio que ocupa y al bajo consumo de gasolina que experimentan los vehículos en los que este sistema va incorporado. En la figura 2.23 se muestra una suspensión independiente de tipo McPherson colocada en el eje trasero de un Alfa Romeo 147.

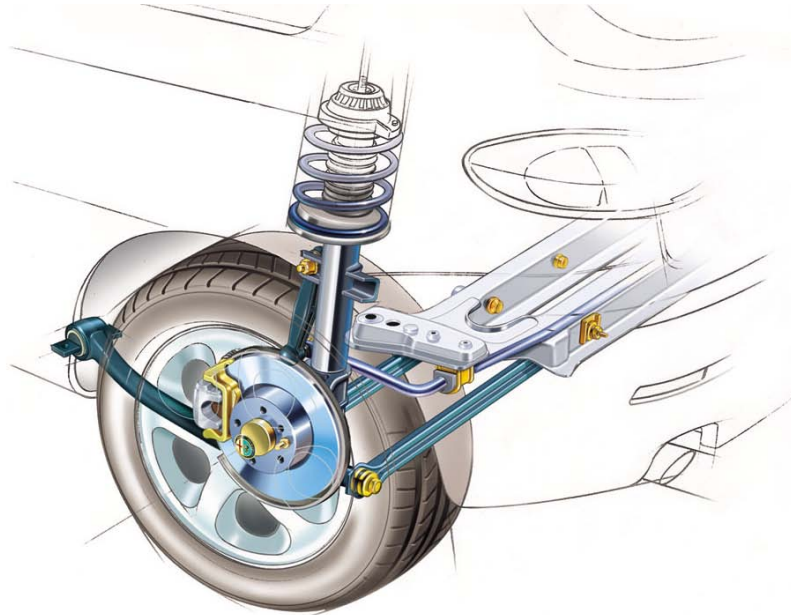


Figura 2.23. Suspensión McPherson de un Alfa Romeo 147

Con el sistema de suspensión McPherson es muy importante que la carrocería sea muy resistente en los puntos donde se fijan los amortiguadores y los muelles, para así absorber los esfuerzos transmitidos por la suspensión.

- **Suspensión de paralelogramo deformable**

La suspensión de paralelogramo deformable, también conocida como suspensión por trapecio articulado o suspensión de triángulos superpuestos, es junto con el sistema de suspensión McPherson la más utilizada en un gran número de automóviles tanto para el tren delantero como para el trasero.

En estas suspensiones, el paralelogramo está formado por dos brazos transversales, la mangueta de la rueda y el propio bastidor. En la figura 2.24 se puede observar una suspensión de paralelogramo deformable de un vehículo Mercedes Benz SLS-AMG.

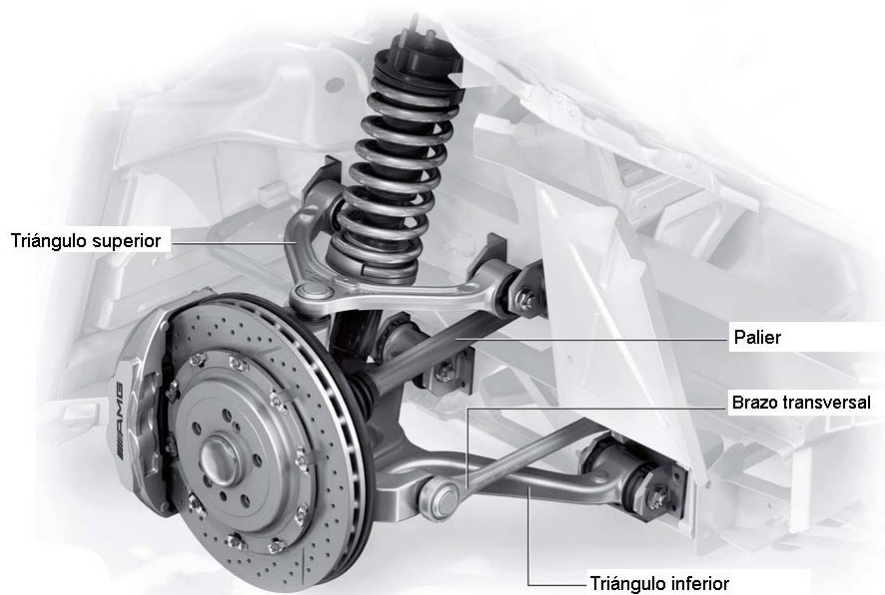


Figura 2.24. Suspensión de paralelogramo deformable de Mercedes Benz

- **Suspensiones multibrazo o *multilink***

Las suspensiones multibrazo son la evolución de los sistemas de suspensiones de paralelogramo deformable explicados en el apartado anterior. La diferencia fundamental añadida en esta evolución es que los elementos de guía de las suspensiones multibrazo o *multilink* pueden tener anclajes elásticos mediante manguitos de goma. Debido a esta variante estas suspensiones permiten modificar tanto los parámetros fundamentales de la rueda como la caída o la convergencia, de la forma más apropiada atendiendo a la estabilidad del automóvil.

La posibilidad de modificar varios parámetros atendiendo únicamente a la estabilidad del vehículo significa que puede alcanzarse un grado máximo de confort y estabilidad direccional, y que las dinámicas longitudinal y transversal pueden configurarse de forma precisa y prácticamente independiente entre sí.

La figura 2.25 muestra una suspensión multibrazo colocada en la suspensión delantera de un Audi A6.



Figura 2.25. Suspensión multibrazo del eje delantero de un Audi A6

Las suspensiones multibrazo se pueden clasificar en dos grupos fundamentales:

- Suspensiones multibrazo con elementos de guía transversales u oblicuos con funcionamiento similar al de las suspensiones de paralelogramo deformable.
- Suspensiones multibrazo que además disponen de brazos de guía longitudinal con un funcionamiento que recuerda a los sistemas de suspensión de ruedas tiradas por brazos longitudinales.

La figura 2.26 muestra una suspensión multibrazo colocada en el eje trasero de un vehículo de tracción a las cuatro ruedas.

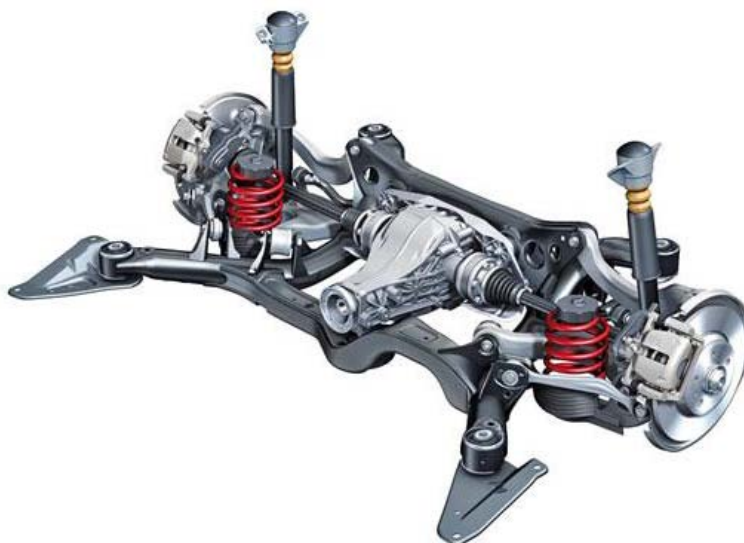


Figura 2.26. Suspensión multibrazo en el eje trasero

OTROS TIPOS DE SUSPENSIÓN

Además de los tipos de suspensión expuestos anteriormente, existen otros tipos de sistemas que no atienden a la clásica disposición muelle helicoidal-amortiguador telescópico. Aunque son suspensiones muy particulares y con escasa presencia en el mercado, a continuación se detallarán la suspensión hidroneumática y la suspensión neumática.

- **Suspensiones Hidroneumáticas**

La suspensión hidroneumática es un sistema que poco tiene que ver con los convencionales. Se basa en esferas que sustituyen al conjunto muelle-amortiguador. En su interior contienen aire y un fluido separados por una membrana. El líquido, empujado por una bomba de alta presión, forma parte de un circuito hidroneumático que une los cuatro extremos del coche. Cuando la rueda encuentra un obstáculo aumenta la presión del líquido y a través de la membrana comprime el aire, que luego se vuelve a expandir, haciendo las funciones de muelle y amortiguador, como se muestra en la figura 2.27. El sistema hidroneumático aporta algunas ventajas, como son el hecho de poder nivelar el vehículo así como la posibilidad de ajustar la rigidez de la suspensión [6, 7].

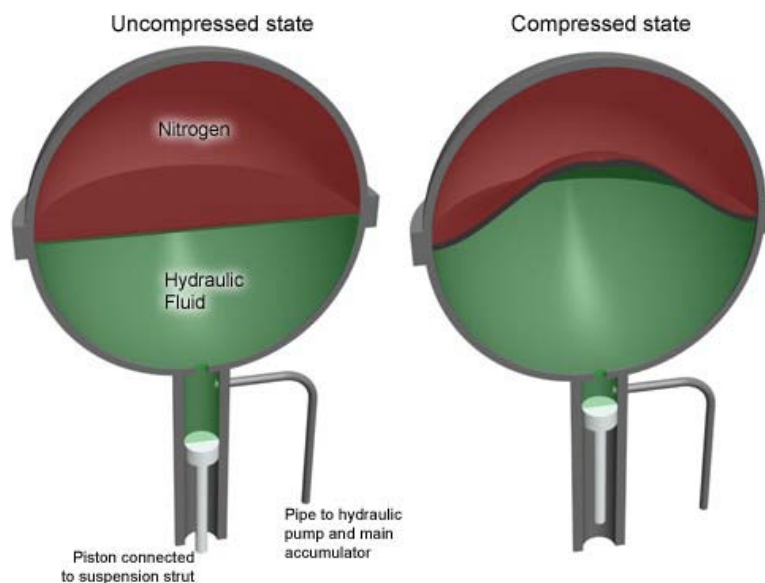


Figura 2.27. Funcionamiento del sistema de suspensión Hidroneumático

La última evolución de este sistema es la denominada por Citroën *Hidractiva 3*, en la que se mantienen los muelles neumáticos y el sistema de conductos de aceite en el que están integrados los amortiguadores. En la figura 2.28 se muestran los elementos del sistema *Hidractiva* de Citroën en un C5.

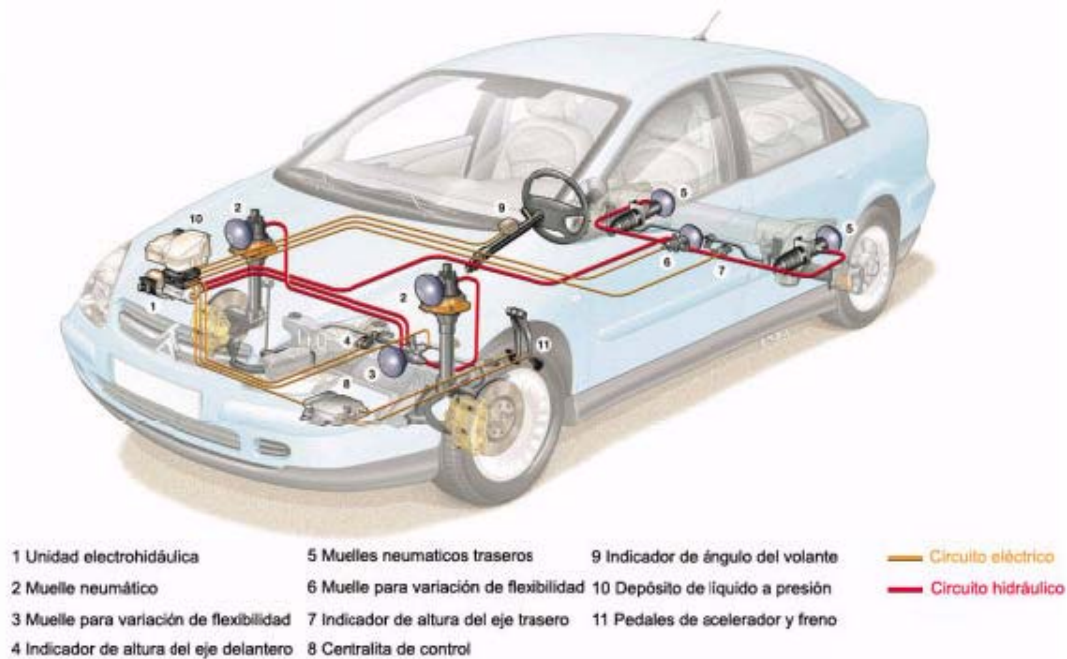


Figura 2.28. Elementos del sistema Hidractiva de Citroën montado en un C5

• Suspensiones Neumáticas

Las suspensiones neumáticas se utilizan desde hace pocos años, sobre todo en vehículos de alta gama. Esta suspensión basa su funcionamiento en las propiedades que ofrece el aire sometido a presión, ya que sustituye el resorte mecánico (muelle, ballesta o barra de torsión) por un fuelle o cojín de aire capaz de variar su rigidez [7, 9].

Las ventajas que ofrece una suspensión neumática son tales como adaptar la carrocería a distintas alturas en función de las necesidades de marcha o adaptar la suspensión y la amortiguación a la situación de la calzada y a la forma de conducir.

Se caracteriza por su elevada flexibilidad, notable capacidad de amortiguación de las vibraciones y por la autorregulación del sistema que permite mantener

constante la distancia entre el chasis y la superficie de carretera independientemente de la carga presente en el vehículo.

En la figura 2.29 se muestra un ejemplo de aplicación de la suspensión neumática en un vehículo.

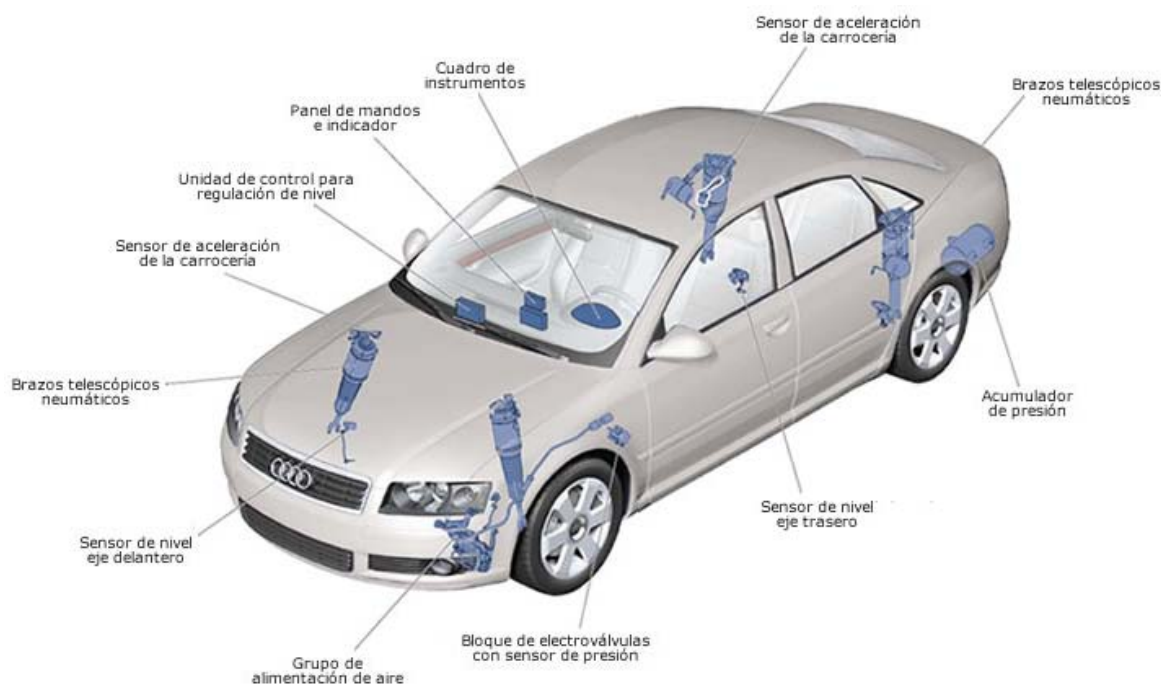


Figura 2.29. Componentes de la suspensión neumática de una Audi A8

2.3.2 CLASIFICACIÓN SEGÚN EL SISTEMA DE CONTROL

Actualmente, la clasificación según el sistema de control engloba tres grandes grupos: suspensión pasiva, suspensión activa y suspensión semiactiva. A continuación se detallará cada una de estas suspensiones [1, 7, 8].

SUSPENSIÓN PASIVA

Las suspensiones pasivas suponen el sistema idóneo para aumentar el confort del pasajero por lo que, tradicionalmente, es este tipo de suspensiones el que se monta en los vehículos. Esta suspensión consiste en un sistema de muelle-amortiguador que trata de absorber las irregularidades del terreno, además de aumentar la seguridad y nivel del confort de los pasajeros.

El principal inconveniente que presentan las suspensiones pasivas es que no ofrecen la posibilidad de regulación de la suspensión, es decir, aunque una suspensión pasiva pueda ser ideal para un terreno determinado, teniendo en cuenta la seguridad de los pasajeros a la vez que el confort, esta dejará de ser válida para otro terreno de características diferentes.

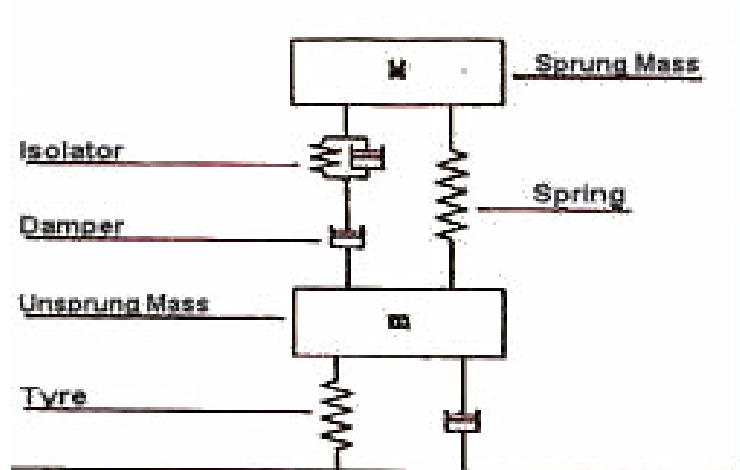


Figura 2.30. Esquema de una suspensión pasiva

SUSPENSIÓN ACTIVA

Las suspensiones activas surgen como solución a la necesidad de desarrollar vehículos que combinaran un alto nivel de confort con un alto nivel de seguridad, manteniendo los neumáticos en permanente contacto con el terreno para eliminar el balanceo en curva y el cabeceo en frenada.

Este sistema de suspensión es capaz de almacenar, disipar e introducir energía en el sistema, de forma que se ajusta continuamente a las condiciones cambiantes de la carretera gracias al actuador que disponen.

Los sistemas de suspensión activa constan de un ordenador que indica a un dispositivo ubicado en cada rueda exactamente cuándo, de qué modo, a cuánta distancia y a qué velocidad debe moverse, lo que permite que los movimientos de la rueda ya no estén sujetos a interacciones aleatorias entre la carretera y los distintos elementos que forman el sistema de suspensión, como pueden ser el muelle, el amortiguador y las barras antivuelco. Dicho ordenador se apoya en una red de

sensores para medir, por ejemplo, la velocidad del vehículo, las aceleraciones longitudinales y laterales, las fuerzas y aceleraciones que actúan sobre cada rueda y así poder tomar las decisiones más correctas y, a continuación, ordenar a la rueda que se mueva del modo idóneo para las circunstancias que van surgiendo.

La principal ventaja de la suspensión activa frente a la suspensión pasiva es la posibilidad de conseguir un control de cada rueda independiente. Debido a este control independiente, se obtiene una mayor adherencia del vehículo al terreno, por lo que aumenta la seguridad en la conducción permitiendo un reposicionamiento de la carrocería casi perfecto. El inconveniente que presentan estas suspensiones es su elevado coste, principalmente en la implementación de las altas frecuencias.

En la figura 2.31 se muestra un esquema simplificado del funcionamiento de una suspensión activa.

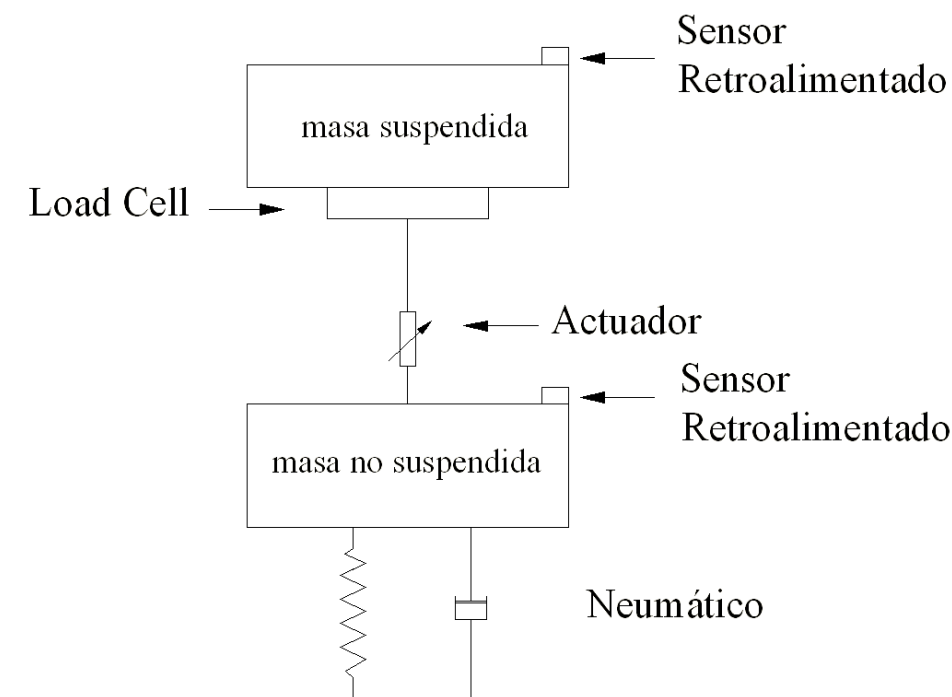


Figura 2.31. Esquema de una suspensión activa

SUSPENSIÓN SEMIACTIVA

Las suspensiones semiactivas son las más utilizadas en los vehículos actuales, ya que son capaces de controlar las bajas frecuencias con elementos activos y las altas frecuencias con elementos pasivos.

Este tipo de suspensión, consta de los mismos elementos que las suspensiones pasivas, amortiguador y muelle, pero, a diferencia de estas, las suspensiones semiactivas pueden modificar el comportamiento. Esta modificación es debido al amortiguador, ya que dispone de válvulas que permiten regular el paso del fluido.

Gracias a la posibilidad de modificar la rigidez, las suspensiones semiactivas ofrecen algunas posibilidades como: la posibilidad de una marcha ajustable, optimizada para obtener el mayor rendimiento en la conducción y el confort, el poder seleccionar la firmeza de la suspensión, o la capacidad de ajustar automáticamente la suspensión según las condiciones de la carretera.

En la figura 2.32 se muestra un esquema del funcionamiento de una suspensión semiactiva.

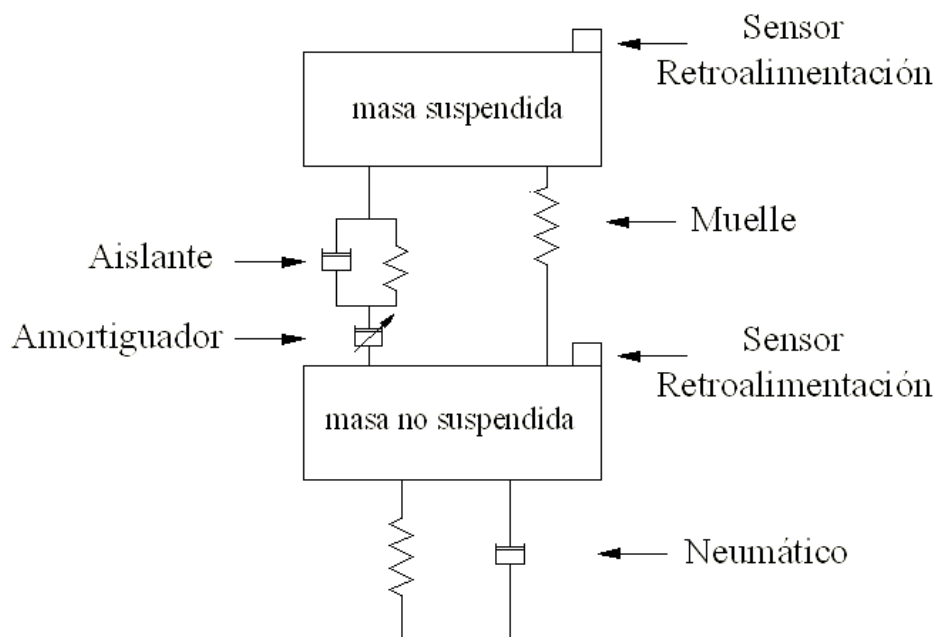


Figura 2.32. Esquema de una suspensión semiactiva

Dentro de las suspensiones semiactivas, surgió primeramente un tipo de suspensión basado en amortiguadores con electroválvulas, pero su tiempo de respuesta era demasiado alto. Actualmente está surgiendo un nuevo tipo de suspensión basado en amortiguadores magneto-reológicos, capaces de modificar su viscosidad en un

tiempo relativamente pequeño para variar la dureza del amortiguador. Este tipo de suspensión se desarrollará en el capítulo 3 de este proyecto.

A continuación, se explican brevemente otros sistemas de suspensión semiactiva que han desarrollado internamente diferentes marcas de vehículos:

- El sistema *Airmatic Dual Control* de Mercedes Benz, el cual actúa sobre la rigidez del amortiguador y del muelle. Durante la conducción normal, el muelle funciona con su volumen de aire máximo, por lo que ofrece una amortiguación blanda. En cuanto el sistema detecta oscilaciones importantes en la carrocería, el muelle prescinde de aire para endurecerse.

- El sistema *Four-C (Continuously Controlled Chasis Concept)* del Volvo S60 R, es una amortiguación regulable electrónicamente. Posee la capacidad de variar muy rápidamente la dureza de cada uno de los amortiguadores. En la figura 2.33 se muestra un ejemplo del sistema *Four-C* integrado en un Volvo S60 R.



Figura 2.33. Sistema *Four-C* del Volvo S60 R

- El sistema *CATS (Computer Active Technology Suspension)*, es una suspensión instalada en los modelos más deportivos de Jaguar que consigue un ajuste automático de la dureza de los amortiguadores mediante una regulación electrónica en función de una señal sensorial.

CAPÍTULO 3

FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS

3.1 INTRODUCCIÓN

La reología, cuyo término fue sugerido en 1929 por Eugene Cook Bingham, es la ciencia que atiende al estudio de la deformación de sustancias bajo el efecto de fuerzas externas, limitándose únicamente a materiales que no obedecen a la Ley de viscosidad de Newton y a la Ley de Hooke. El estudio de esta ciencia actualmente es muy importante en diversas industrias como las plásticas, las de alimentación, las lubricantes o las de pinturas [10, 11].

Desde el punto de vista histórico, el origen de la reología se fija a mediados del siglo XVII, época en la que Isaac Newton y Robert Hooke dieron a conocer sus diferentes teorías sobre el fluido viscoso y el sólido elástico, respectivamente.

De este modo, a finales del siglo XVII (1687) Newton definió el líquido viscoso, también denominado fluido newtoniano, enunciando que la resistencia que se produce como consecuencia de la falta de deslizamiento entre las partes de un líquido es proporcional a la velocidad con la que dichas partes se separan las unas de las otras, es decir, la energía suministrada al sistema se disipa en forma de calor, sin recuperar ni siquiera parcialmente su forma original.

En cuanto al estudio del sólido elástico, apareció también en esta época (1678) la Ley de Hooke, clave para el estudio de la reología de sustancias sólidas. La ley de Hooke establece que si se aplica una carga sobre un cuerpo sólido, este va a sufrir una cierta deformación elástica, siempre y cuando no se sobrepase el límite de elasticidad.

A partir del anuncio de estas dos leyes, surgieron los primeros estudios relacionados con la reología, que se reducían a aplicar la ley de Newton para líquidos y la ley de Hooke para sólidos. Fue a partir del siglo XIX cuando los científicos comenzaron a tener dudas acerca de la validez universal de estas dos leyes lineales. De esta forma la reología moderna, además de los comportamientos elástico y viscoso, estudia también sistemas complejos que presentan simultáneamente propiedades elásticas y viscosas, es decir, sustancias viscoelásticas.

3.1.1 PROPIEDADES REOLÓGICAS

Las propiedades reológicas de los fluidos controlables son dependientes de diversos términos como la concentración y densidad de las partículas, de las distribuciones de forma y tamaño de las partículas o las propiedades del fluido portador, entre otros. La interdependencia de estos factores resulta muy compleja, siendo a su vez muy importante en el establecimiento de metodologías para optimizar el desempeño de estos fluidos para aplicaciones particulares [10].

Como se explicó en el capítulo anterior, los dispositivos amortiguadores son muy importantes para el control de vibraciones. Los amortiguadores de fluido viscoso se basan en las propiedades constantes de dicho fluido para contrarrestar los efectos de la vibración. Estos amortiguadores presentan la desventaja de que, al ser las propiedades del fluido constantes, también lo serán su coeficiente de amortiguamiento y el valor de la fuerza generada.

Debido a esa desventaja, surgen los amortiguadores magneto-reológicos, dispositivos que utilizan fluidos magnéticos que pueden cambiar sus propiedades mediante un estímulo magnético, lo cual puede ser aprovechable para proveer una rápida respuesta en el control de vibraciones.

La figura 3.1 muestra el esfuerzo de corte de cuatro fluidos magnéticos distintos en función de la densidad de flujo a una velocidad de corte máxima de 26 s^{-1} . Dicha velocidad de corte es la relación entre la velocidad que experimenta el fluido con la distancia que recorre. El orden ascendente de los registros corresponde a un incremento en la fracción de volumen de hierro. Como se observa en la figura 3.1, la viscosidad del fluido en ausencia de un campo magnético varía significativamente en función del aceite portador, de los agentes de suspensión y de la carga de partículas.

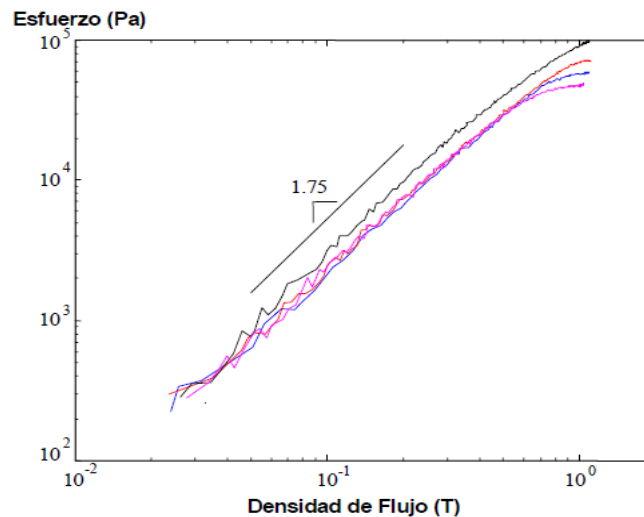


Figura 3.1. Esfuerzo de corte en función de la densidad de flujo

La figura 3.2 muestra un gráfico de esfuerzo de corte, es decir, la viscosidad de cuatro fluidos magnéticos como función de la velocidad de corte. Puede observarse que la viscosidad del fluido no es estrictamente proporcional a la carga de hierro.

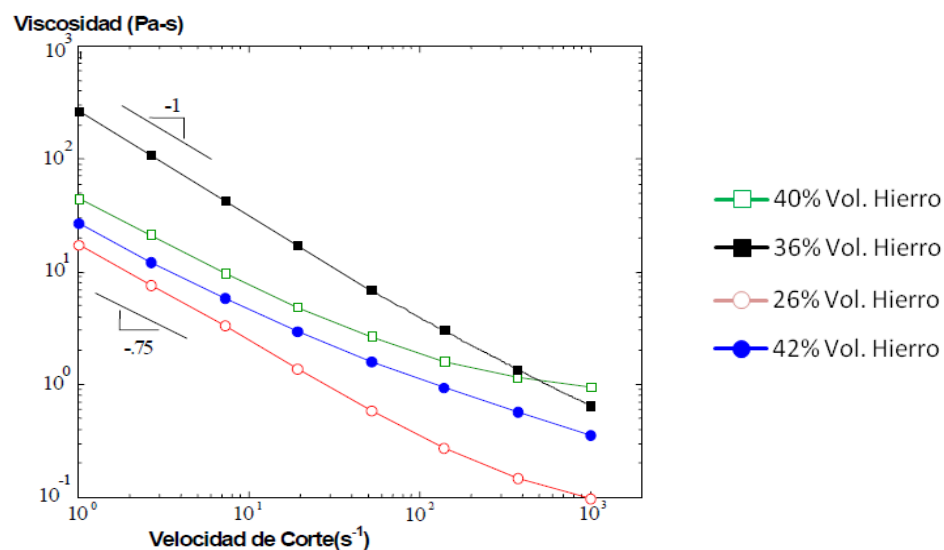


Figura 3.2. Viscosidad como función de la velocidad de corte

3.1.2 POSIBLES APLICACIONES DE LA REOLOGÍA

A continuación, se citan algunos procesos industriales en los que se aplican los conocimientos reológicos actuales [12]:

- Estudio de la textura y consistencia de productos alimenticios: dichas propiedades son muy importantes a la hora de que un producto sea del agrado del consumidor.
- Control de calidad de los alimentos: este control se realiza en la propia línea de producción.
- Producción de pegamentos: el estudio de su plasticidad, de la forma de fluir dentro del recipiente que lo contiene, etc.
- Producción de medicamentos: se estudia su estabilidad química, su tiempo de caducidad y su facilidad de extrusión, entre otras.
- Caracterización de elastómeros y de polímeros tipo PVC.
- Estabilidad de emulsiones y suspensiones.
- Caracterización de gasolinas y otros tipos de hidrocarburos.
- Estudio del magma en vulcanología: cuanto más fluido sea el magma más tendencia va a tener el volcán a que provoque una erupción.
- Control de sustancias que sean transportadas a lo largo de un recipiente cilíndrico.

3.2 LOS MATERIALES INTELIGENTES

Hoy en día, el término “inteligente” se ha adoptado como un modo correcto para calificar y describir a una clase de materiales que presentan la capacidad de cambiar sus propiedades físicas (rigidez, viscosidad, forma, color, etc.) en presencia de un estímulo concreto [13].

Actualmente no existe un criterio único para poder aplicar este término a un material o estructura, pero sí existe un acuerdo en los criterios que deben presentar los llamados materiales o estructuras inteligentes:

- Los materiales presentan sensores de reconocimiento y medida de la intensidad del estímulo ante el que reaccionará el material.
- A su vez presentan “actuadores”, embebidos o intrínsecos, que responden ante dicho estímulo.
- Para controlar la respuesta de una forma predeterminada presentan mecanismos de control y selección de la respuesta.
- El tiempo de respuesta es pequeño.
- El sistema regresa a su estado original tan pronto como el estímulo cesa.

Si se tienen en cuenta los criterios citados anteriormente, se podría adoptar como definición de sistema inteligente la siguiente: *“Sistema o material que presenta sensores, ‘actuadores’ y mecanismos de control, intrínsecos o embebidos, por los cuales es capaz de sentir un estímulo, de responder ante él de una forma predeterminada en un tiempo apropiado y de volver a su estado original tan pronto como el estímulo cesa”*.

En los siguientes apartados se describen brevemente los materiales más habituales y conocidos.

3.2.1 MATERIALES CON MEMORIA DE FORMA

El efecto de memoria de forma puede describirse como la capacidad de un material para cambiar la forma cuando se le aplica un estímulo externo, siendo este, por ejemplo, un campo magnético. En la figura 3.3 se muestra una representación de la evolución que experimentan los materiales con dicho efecto [13, 14].

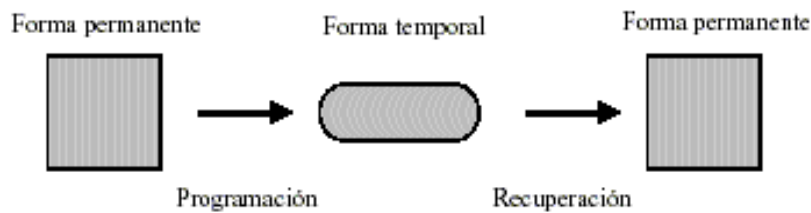


Figura 3.3. Representación simplificada del efecto de forma

El término de materiales con memoria de forma engloba cuatro grandes grupos bien diferenciados, según la naturaleza, o del material en sí, o del estímulo externo al que responden. Los cuatro grupos son:

- Aleaciones con Memoria de Forma (*Shape Memory Alloys, SMAs*).
- Polímeros con Memoria de Forma (*Shape Memory Polymers, SMPs*).
- Cerámicas con Memoria de Forma (*Shape Memory Ceramics, SMCs*).
- Aleaciones Ferromagnéticas con Memoria de Forma (*Ferromagnetic Shape Memory Alloys, FSMAs*).

En el caso del primer grupo, las aleaciones metálicas, el efecto de memoria de forma se basa en la transición que se produce entre dos fases sólidas, una de baja temperatura, también denominada martensítica, y otra de alta temperatura o austenítica.

En cuanto a los materiales de la segunda clase, los polímeros con memoria de forma, son materiales poliméricos con la capacidad de recordar su forma original. Este efecto está relacionado con la combinación de la estructura y la morfología del polímero junto con el proceso y tecnología de programación de inclusión de la forma

empleados, es decir, es necesario un entrenamiento del material para que recuerde una forma determinada.

Los materiales del tercer grupo, los cerámicos con memoria de forma, atienden a la definición general de materiales inorgánicos, no metálicos, que se producen habitualmente empleando arcillas y otros minerales naturales o procesados químicamente.

Por último, las aleaciones ferromagnéticas con memoria de forma constituyen una nueva clase de materiales que sufren el efecto de memoria de forma bajo la aplicación de diferentes campos magnéticos. En el caso de dichas aleaciones (*FSMAs*), su comportamiento es similar al de las aleaciones con memoria de forma (*SMA*s) pero el estímulo al que responden, en vez de ser la temperatura, es el campo magnético aplicado. En la figura 3.4 se muestra una representación del cambio en la estructura cristalina que se produce durante el cambio de fase en las aleaciones con memoria de forma.

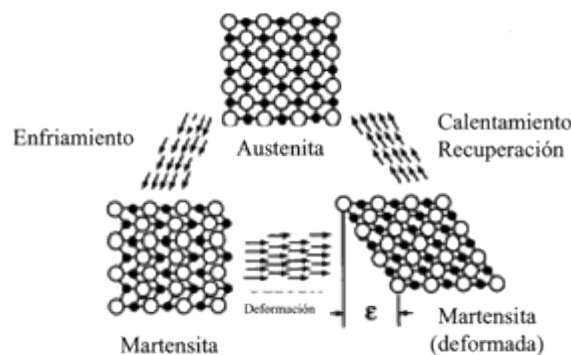


Figura 3.4. Cambio de estructura cristalina en aleaciones con memoria de forma

3.2.2 MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS Y ELECTROESTRICTIVOS

Los materiales piezoeléctricos adquieren un potencial o un campo eléctrico cuando se someten a esfuerzo mecánico. Típicamente, este cambio se manifiesta mediante el desarrollo de un esfuerzo producido monotónicamente que crece con el campo aplicado. De ahí su habilidad para proveer una simple, silenciosa y rápida respuesta en la interfaz entre controles electrónicos y sistemas mecánicos. También, se produce el efecto contrario, ya que estos materiales se deforman cuando se les

aplica un voltaje. De acuerdo con esto, el 'efecto piezoeléctrico' es un fenómeno que resulta de una relación entre las propiedades eléctricas y las mecánicas del material.

Los materiales electrostrictivos presentan el efecto de electrostricción, el cual implica un cambio de la dimensiones cuando se aplica un campo eléctrico. Una diferencia de estos materiales con los piezoeléctricos es que en los primeros existe una dependencia cuadrática de la permisividad sobre el campo eléctrico, mientras que en los últimos existe dependencia lineal. Los materiales magnetostrictivos pueden responder a campos magnéticos como los piezoeléctricos responden a un campo eléctrico [8].

3.2.3 MATERIALES FOTO Y CROMOACTIVOS

Los materiales fotoactivos son aquellos en los que se producen cambios de diferente naturaleza como consecuencia de la acción de la luz. Estos materiales también son capaces de emitir luz como consecuencia de algún fenómeno externo. Los materiales que se definen como fotoactivos son [13]:

- *Materiales electroluminiscentes*: son materiales organometálicos que emiten luz de diferentes colores cuando son estimulados por una corriente eléctrica.
- *Materiales fluorescentes*: son materiales semiconductores que emiten luz visible como resultado de activación con luz UV.
- *Materiales fosforescentes*: son materiales semiconductores que convierten la energía absorbida en luz visible en la oscuridad una vez eliminado la excitación.

En cuanto a los materiales cromosactivos, son aquellos en los que se producen cambios de color como consecuencia de algún fenómeno externo como puede ser la corriente eléctrica, radiación UV o temperatura.

3.3 FLUIDOS REOLÓGICOS

Los fluidos reológicos son fluidos cuyas propiedades varían ante la presencia de un campo eléctrico o magnético exterior. Estos fluidos son líquidos inertes que contienen partículas en suspensión, cuyo tamaño es del orden de milímetros o incluso inferior y son habitualmente aceites de silicona o minerales [8, 14, 15].

Cuando los fluidos reológicos no se ven alterados por un campo exterior, pueden considerarse fluidos newtonianos. En esta condición se comportan como un fluido normal, es decir, ante una velocidad de deformación de deslizamiento oponen un esfuerzo viscoso y este esfuerzo es proporcional a la velocidad de deformación a través de la viscosidad del fluido.

Cuando se aplica un campo exterior, las partículas en suspensión forman cadenas en la dirección del campo. Si el campo se aplica perpendicularmente a la dirección del fluido, entonces las cadenas se forman perpendicularmente al flujo y como consecuencia del propio flujo estas cadenas se rompen y deben ser otra vez formadas, de manera que la continua rotura y formación de cadenas da como resultado la aparición de un esfuerzo que se opone al movimiento. Para producir el deslizamiento de las capas de fluido es necesario superar este esfuerzo denominado de fluencia.

Existen dos tipos de fluidos reológicos que pueden considerarse materiales activos. El primer tipo son los fluidos magneto-reológicos, mientras que el segundo son los fluidos electro-reológicos. Ambos comparten el principio o la base de los fluidos reológicos, y su diferencia radica en que son sensibles a campos externos diferentes. Los fluidos magneto-reológicos varían sus propiedades frente a un campo magnético, mientras que los fluidos electrorreológicos cambian frente a un campo eléctrico. Esta propiedad es consecuencia de la formación de estructuras dentro del fluido como respuesta a los estímulos exteriores.

La ventaja que presentan estos fluidos es que para conseguir una velocidad de deformación determinada es necesario un esfuerzo viscoso superior al que

correspondería en el caso de un fluido ordinario, y este esfuerzo es controlable en función de la intensidad del campo exterior. Como se observa en la figura 3.5, este aumento del esfuerzo viscoso no se debe a un aumento de la viscosidad, sino que se produce porque el esfuerzo de fluencia aumenta con el valor del campo exterior. Dicho aumento de esfuerzo viscoso hace de estos fluidos especialmente atractivos para aplicaciones relacionadas con el amortiguamiento y control activo de vibraciones. El aumento antes citado de esfuerzo viscoso de estos fluidos los hace especialmente atractivos para aplicaciones relacionadas con el amortiguamiento y control activo de vibraciones.

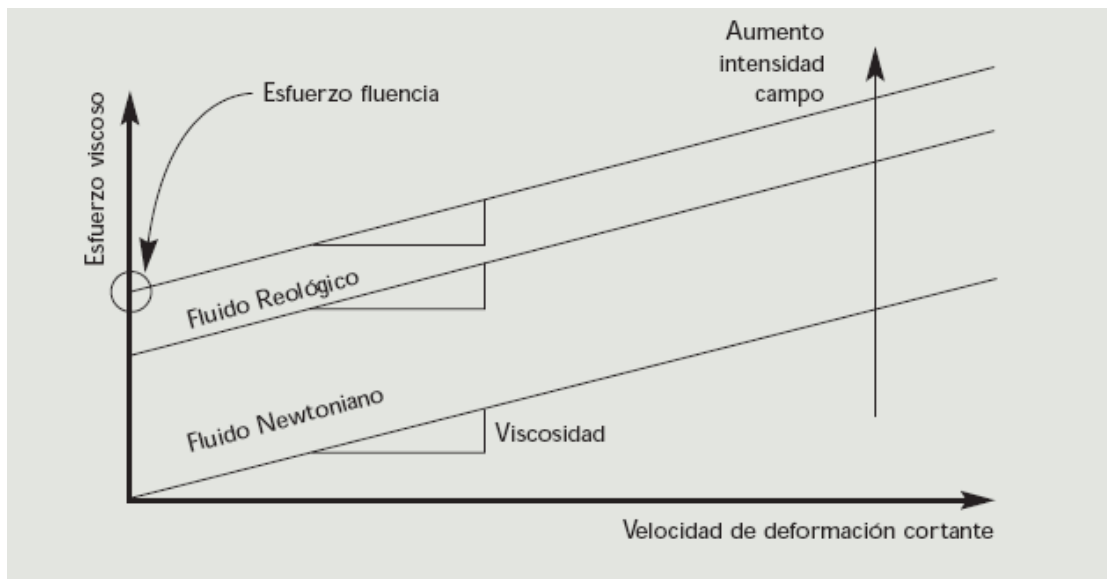


Figura 3.5. Gráfica que relaciona el esfuerzo viscoso con la velocidad de deformación

Es debido a esta característica por lo que los fluidos reológicos se han empleado generalmente como actuadores y especialmente en el control de vibraciones. Como inconveniente, estos fluidos presentan limitaciones de su implantación ya que necesitan elevados niveles de campo exterior para producir niveles aceptables de actuación.

El presente proyecto se centra en los amortiguadores magneto-reológicos, por lo que los fluidos que adquieren una mayor importancia son los sensibles a la influencia de un campo magnético exterior, es decir, los fluidos magneto-reológicos, que se detallarán a continuación.

3.3.1 FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS

Atendiendo a la historia, el fluido magneto-reológico fue inventado por Jacob Rabino en el año 1947. Rabino observó que aplicando un campo magnético sobre una suspensión de limaduras de hierro en aceite, se alineaban de tal forma que adquirirían la consistencia de un sólido. Este cambio de consistencia a sólido se desarrollaba en aproximadamente medio segundo y no se veía afectada por los cambios térmicos. Además, cuanto mayor fuera el magnetismo aplicado, mayor era la consistencia de la suspensión [8, 15, 16, 17].

Los fluidos magneto-reológicos son suspensiones acuosas de microesferas súper-paramagnéticas que contienen gránulos de magnetita dispersos en una matriz polimérica, y sus partículas no tienen remanencia ni histéresis magnética y normalmente se suele añadir un surfactante para estabilizar las suspensiones. Cuando se aplica un campo magnético externo sobre el fluido, siempre que la interacción magnética domine sobre la térmica, se forman cadenas de partículas magnéticas en la dirección del campo aplicado. La formación de estos agregados cambia drásticamente las propiedades mecánicas y ópticas.

Las partículas antes citadas de los fluidos magneto-reológicos tienen un tamaño que oscila entre 0.05 y 8 μm . Entre otros, este tamaño de partículas hace que los fluidos magneto-reológicos presenten grandes ventajas frente a los ferrofluidos, motivo por el que son utilizados principalmente en los amortiguadores magneto-reológicos.

Estas estructuras restringen la movilidad del fluido y consecuentemente se incrementa la viscosidad y se desarrolla una resistencia en la suspensión. Cuanto mayor sea el campo magnético aplicado mayor será la energía mecánica necesaria para romper dichas estructuras.

En la figura 3.6 se muestra el efecto de la presencia de un campo magnético sobre el campo de velocidades de un fluido magneto-reológico.

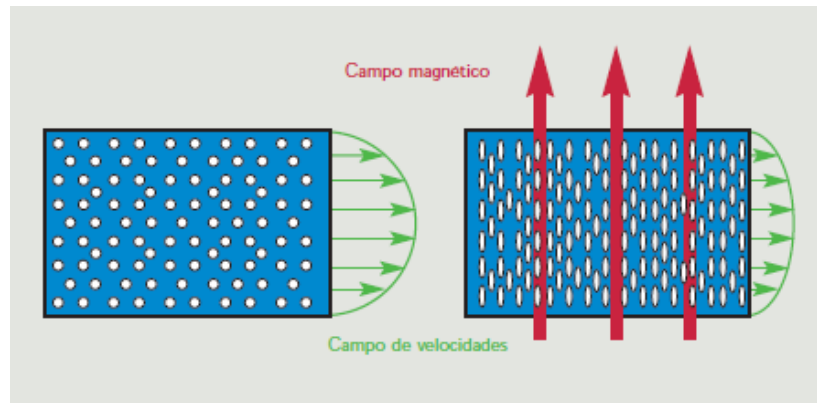


Figura 3.6. Campo de velocidades en un fluido magnético

El diseño de un fluido magneto-reológico requiere la selección previa del aceite base, la naturaleza del material en suspensión, los aditivos necesarios, con el objetivo último de conseguir que el fluido presente respuesta suficiente al campo magnético y, muy importante, que presente estabilidad frente a la agregación y sedimentación de las partículas [18].

3.4 APLICACIONES ACTUALES

Las aplicaciones tecnológicas de los fluidos inteligentes se pueden encontrar en industrias como la aeroespacial, biomedicina o ingeniería civil. Una aplicación particular de los materiales inteligentes es que pueden ser utilizados como sensores o como actuadores [19]:

- Los sensores son realizados con materiales inteligentes que emplean como señal de entrada campos mecánicos. En base al correspondiente fenómeno físico experimentado por los sensores, estos campos son transformados en señales de salida que pueden ser fácilmente medibles, y que generalmente implican campos eléctricos que producen diferencia de potencial eléctrico o campos magnéticos que inducen corriente eléctrica.

- Los actuadores emplean como señales de entrada campos eléctricos, térmicos o magnéticos que mediante las propiedades del material activo son transformadas en una señal de salida mecánica como un campo de desplazamientos, deformaciones o esfuerzos, con la consiguiente generación de una fuerza que puede ser empleada en realizar un cierto trabajo.

Las principales aplicaciones de los fluidos magneto-reológicos son algunas como la suspensión de asientos para vehículos, amortiguadores de vibración, vibración sísmica, frenos rotativos o prótesis médicas. A continuación se detallarán dichas aplicaciones [10, 14, 19, 20].

3.4.1 SUSPENSIÓN DE ASIENTOS PARA VEHÍCULOS DE TRABAJO PESADO

La figura 3.7 muestra un amortiguador de fluido magneto-reológico diseñado para utilizarse en un sistema de suspensión de asiento semiactiva en vehículos de carga para travesías largas.

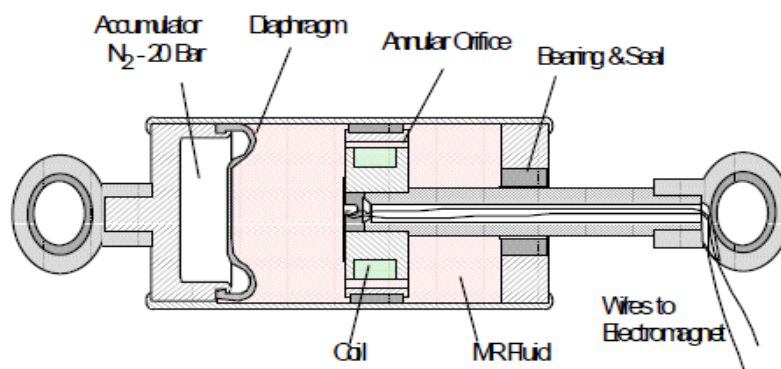


Figura 3.7. Amortiguador de fluido magneto-reológico Rheonetic RD-1001-4

La utilización de estos sistemas de amortiguación en asientos permite un control en tiempo real para obtener una posición óptima para la conducción. Para conseguirlo la unidad de control modifica la intensidad del campo magnético en función del peso del conductor, los niveles de choque y de vibraciones debidos al terreno por el que se circula.

3.4.2 AMORTIGUADORES DE VIBRACIÓN INDUSTRIALES

Dado la naturaleza de las vibraciones, las molestias que pueden causar a las personas que estén cerca del foco y los daños estructurales que pueden producir, es importante la utilización de dispositivos para evitar en la medida de lo posible sus consecuencias.

En la figura 3.8 muestra un amortiguador magneto-reológico utilizado en control activo de vibraciones en aplicaciones industriales.

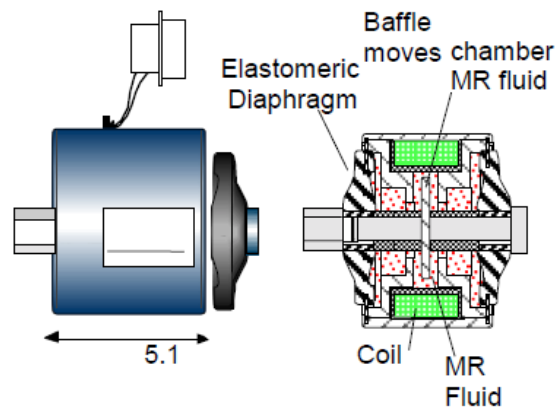


Figura 3.8. Amortiguador de vibraciones “Rheonetic” RD-1013-1

Una de las aplicaciones más comunes dentro de los amortiguadores de vibraciones son los empleados para la disminución de vibraciones en las lavadoras. Con estos sistemas se consigue reducir el ruido producido por las mismas y aumentar, además, su vida útil. En la figura 3.9 se puede observar cómo se emplean los amortiguadores para reducir el efecto de la vibración [21].

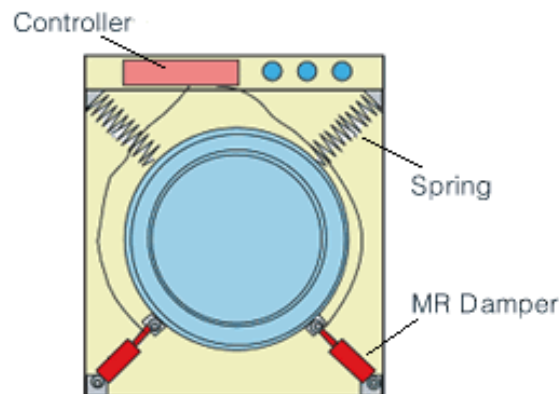


Figura 3.9. Disposición de amortiguadores magneto-reológicos en lavadora

3.4.3 CONTROL DE VIBRACIÓN SÍSMICA EN ESTRUCTURAS

La prueba del incremento en el crecimiento de la tecnología de dispositivos magneto-reológicos es que se han diseñado y construido amortiguadores de tamaño apropiado para aplicaciones en ingeniería civil. Para el diseño nominal, fueron elegidos una fuerza máxima de amortiguamiento de 200000 N y un rango dinámico de diez.

La figura 3.10 muestra un diagrama esquemático de un amortiguador de fluido magneto-reológico de gran escala.

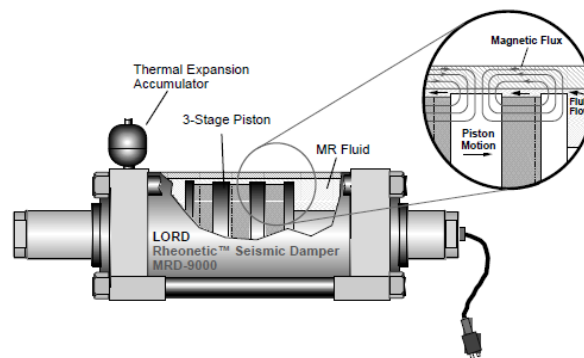


Figura 3.10. Amortiguador sísmico de fluido magneto-reológico Rheonetic MRD-9000

Una de las aplicaciones más frecuentes de este tipo de amortiguadores consiste en la protección sísmica de edificios. Este hecho se debe a unas características muy determinadas de este tipo de amortiguadores.

Estos amortiguadores amplían tanto el control sobre los choques sísmicos iniciales como los de las réplicas gracias a su alta fuerza de disipación de velocidad baja, característica que fundamentalmente actúa frente al choque de las réplicas. No obstante, la reducción del choque inicial se debe a su rápido tiempo de respuesta, así como su alto margen dinámico, lo cual permite una optimización continua del sistema. En la figura 3.11 se muestra cómo sería la colocación de este tipo de dispositivos en un edificio real [21].

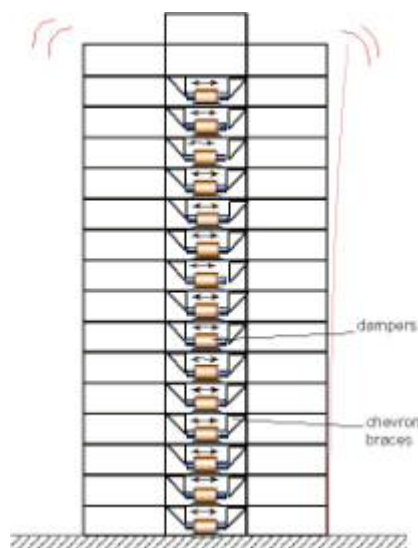


Figura 3.11. Amortiguador magneto-reológico en un edificio

Otra de las aplicaciones civiles donde más se utilizan este tipo de dispositivos se trata de los puentes suspendidos por cables, cuya protección y la de sus eventuales inquilinos son el principal objetivo. De esta forma, al situar los amortiguadores atados a los cables, se proporciona una situación continuamente controlable frente a las tensiones producidas por el viento y la lluvia. Se puede observar en la figura 3.12 el funcionamiento de los amortiguadores en un puente [21].

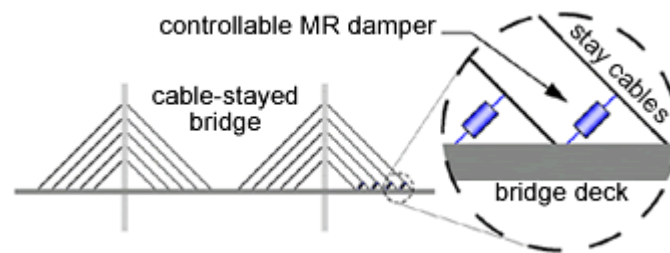


Figura 3.12. Amortiguador magneto-reológico en un puente

3.4.4 FRENO ROTATIVO MAGNETO-REOLÓGICO

Los frenos magneto-reológicos permiten un control continuo del par de torsión. Cuando la corriente en las espiras es cero, no hay campo magnético y por lo tanto el par de torsión es el mínimo que puede proporcionar el freno a causa del cierre hermético y la viscosidad del fluido portador. Al crear un campo magnético, se produce un par de torsión donde el valor máximo depende de la limitación de la máxima corriente que pueda soportar el freno. La principal ventaja de los frenos magneto-reológicos son su fácil manejo y su diseño simple [8].

La figura 3-7 muestra un esquema simplificado de los elementos que conforman un freno magneto-reológico, así de su funcionamiento.

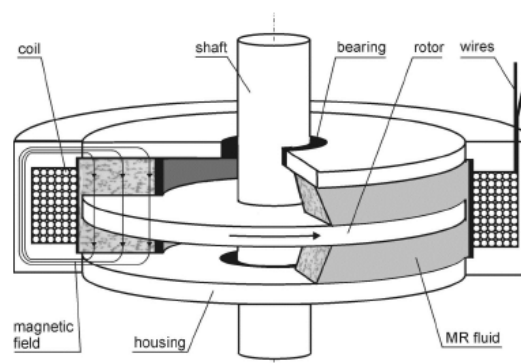


Figura 3.13. Esquema de un freno magneto-reológico

3.4.5 PRÓTESIS MÉDICAS

La principal aplicación de este tipo de amortiguadores en la industria médica se trata de la mejora en la movilidad de aquella pierna que fue amputada por encima de la rodilla. De esta forma, Biedermann Motech, un fabricante alemán de productos protésicos desarrolló un sistema que aumenta el equilibrio del paso, la estabilidad y la eficiencia de la energía empleada al caminar.

Este sistema, aparte de disponer del amortiguador, contenía un sistema de sensores que transferían la información a un programa informático, que a su vez transmitía la orden necesaria al amortiguador. Dicho sistema se muestra en la figura 3.14 [21].

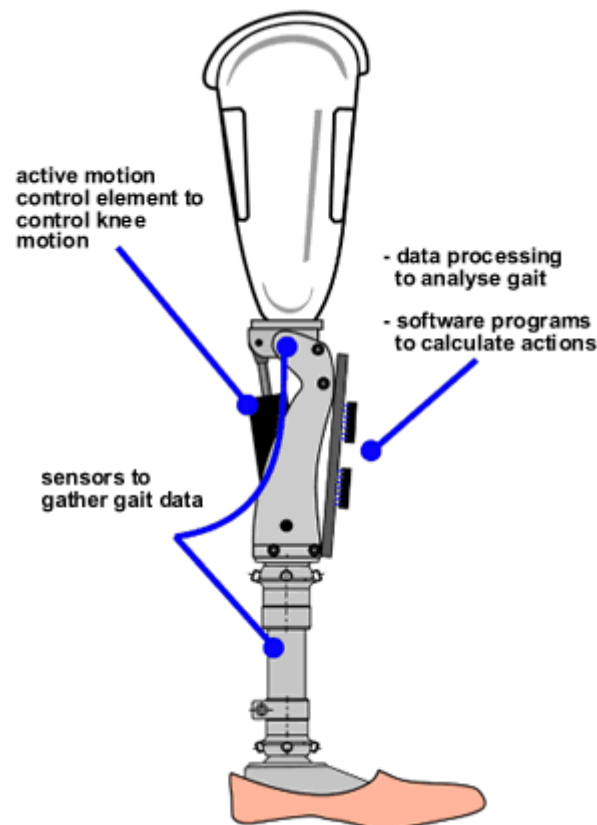


Figura 3.14. Prótesis con amortiguador magneto-reológico

3.5 AMORTIGUADORES MAGNETO-REOLÓGICOS PARA SUSENSIONES VEHICULARES

Los amortiguadores magneto-reológicos suponen un nuevo avance en sistemas de suspensión desde que el fabricante de componentes para la amortiguación Delphi presentara su sistema de amortiguación basado en amortiguadores magneto-reológicos en el salón de Fráncfort en 1999 [6, 17, 22].

El sistema desarrollado por Delphi consistía en una suspensión semiactiva con amortiguador de fluido magneto-reológico llamado “*Magnetic Ride*”. La única diferencia respecto a otros sistemas es el líquido que circula por dentro del vástago, ya que éste contiene un 40% de partículas metálicas. El sistema *Magnetic Ride* está compuesto por amortiguadores que contienen un fluido magneto-reológico y bobinas electromagnéticas, además de sensores que detectan tanto el desplazamiento de la suspensión como la aceleración transversal y longitudinal por la unidad de mando.

Al aplicar una pequeña corriente electromagnética, las partículas se orientan en una disposición similar y convierten el líquido en una sustancia con aspecto fibroso y mucho más viscoso. Esta particularidad permite ajustar la dureza del mecanismo en cada instante, bien al gusto del conductor, bien a las exigencias de la carretera. En la figura 3.15 se muestra la estructura y funcionamiento de un amortiguador magneto-reológico.

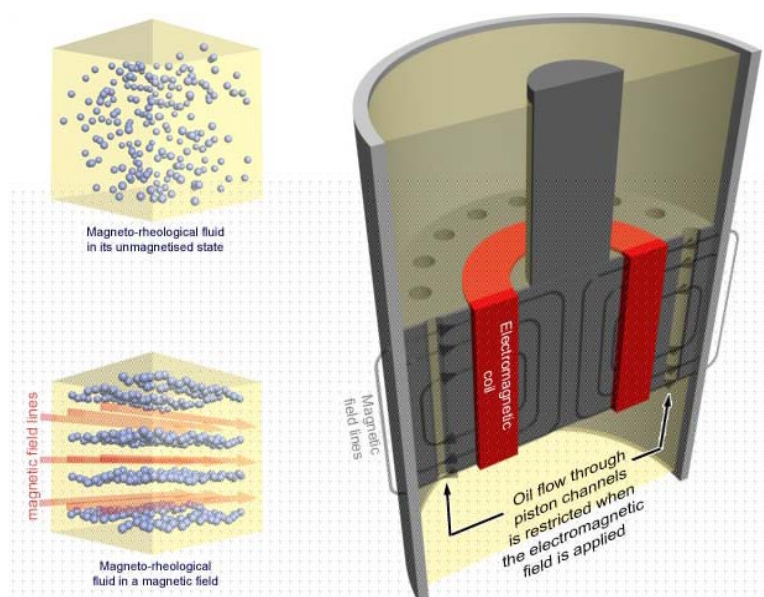


Figura 3.15. Estructura de un amortiguador magneto-reológico

Como ya se comentó en el apartado 3.3, la consistencia de la suspensión depende de la intensidad del campo magnético aplicado. A continuación, se procede a explicar el modo de funcionamiento del sistema *Magnetic Ride*.

Los sensores de desplazamiento de la amortiguación mandan señales a la unidad de mando y esta aplica una intensidad de corriente a cada amortiguador dependiendo de la señal que previamente haya recibido de la unidad de mando.

Esta intensidad de corriente la recibe la bobina electromagnética del amortiguador, variando el campo magnético en relación con la intensidad recibida y, por lo tanto, variando la densidad y consistencia del fluido magneto-reológico.

Los valores de la consistencia de dicho fluido y por lo tanto de la suspensión, dependiendo de la conducción, cambian unas 1000 veces por segundo, lo que hace ajustar inmediatamente la suspensión a las necesidades de conducción.

Este sistema no solamente se adaptará a las necesidades de la conducción dependiendo del firme, sino que su sensor de aceleración hace que también se adapte a las aceleraciones y frenadas del vehículo, adaptando la amortiguación delantera a una consistencia dura en el momento de la frenada y la trasera en el caso de las aceleraciones, evitando de esta forma hundimientos.

Los amortiguadores hidráulicos poseen válvulas que generan ruidos; la ausencia de las mismas hace que este sistema de amortiguación sea silencioso.

Actualmente, este tipo de suspensión la utilizan vehículos de altas prestaciones y de lujo. Algunos ejemplos de estos vehículos de altas prestaciones son los Chevrolet Corvette, los Audi R8 y TT, los Cadillac Seville ó los Ferrari 599 GTB y California.

La imagen 3.16 muestra un Audi R8 equipado con el sistema Magnetic Ride de Delphi.



Figura 3.16. Audi R8 equipado en el sistema *Magnetic Ride* de Delphi

3.5.1 VENTAJAS E INCONVENIENTES

Las principales ventajas que presenta un amortiguador magneto-reológico son las siguientes [22]:

- Su tiempo reacción es diez veces más rápida que el amortiguador basado en electroválvulas.
- Los sensores pueden modificar la fluidez del líquido hasta mil veces cada segundo, lo que significa la posibilidad de una regulación instantánea.
- Estos amortiguadores no requieren mantenimiento, es decir, son muy fiables
- Bajo requerimiento energético: 20 W por cada amortiguador.
- Control dinámico de todo el automóvil, independiente en cada una de las cuatro ruedas.
- Simplicidad mecánica, al no precisar de válvulas ni electroválvulas.

Sin embargo, presenta las siguientes inconvenientes [8]:

- Al ser una tecnología moderna, todavía no está implantada ni totalmente desarrollada, por lo que supone un coste bastante alto.
- También supone un sobrecoste el hecho de que para una correcta optimización de los amortiguadores magneto-reológicos, los dispositivos electrónicos adquieren una importancia muy alta, así como su implantación en el vehículo. En la figura 3.17 se muestra la disposición de los distintos dispositivos electrónicos en un Audi R8.
- Necesitan un aporte de energía, ya que los amortiguadores convencionales no precisan de dicho aporte.

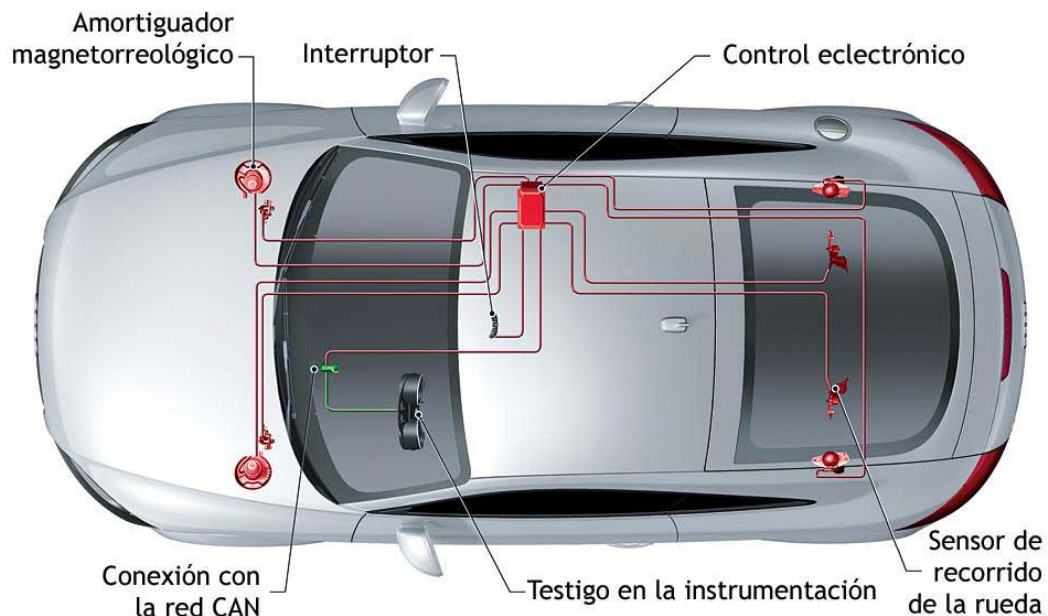


Figura 3.17. Elementos de la amortiguación magneto-reológica en una Audi R8

CAPÍTULO 4

ADAPTACIÓN DE UN AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO RD-1005.3 A LA SUSPENSIÓN DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo, se describirá el proceso seguido para llevar a cabo la adaptación de un amortiguador magneto-reológico RD-1005.3, que comercializa la empresa Lord, en un vehículo automóvil.

Para la adaptación del amortiguador magneto-reológico, se ha utilizado la carcasa de un amortiguador deportivo, a la cual se le han realizado distintas modificaciones. Posteriormente, se ha desmontado el amortiguador delantero derecho y se ha sustituido por el amortiguador magneto-reológico.

Para hacer posible la comparación entre el amortiguador de serie del vehículo y el amortiguador magneto-reológico, es necesaria la toma de datos sobre el comportamiento de ambas suspensiones ante diferentes perfiles de carreteras. Para realizar dicha toma de datos se han instalado dos sensores de desplazamiento, uno en la suspensión izquierda y otro en la suspensión derecha. Previamente a su instalación en el vehículo, se ha realizado su calibración, tal y como se describe en el apartado 4.2.

Por otra parte, se ha desarrollado un software para la toma de datos procedentes de los sensores de desplazamiento. Se ha tomado como base de

desarrollo el sistema *LabVIEW*. El citado software se ha instalado en un equipo portátil y se ha calibrado en el propio vehículo para la posterior toma de datos.

4.2 INCORPORACIÓN DE UN AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO RD 1005.3 EN LA SUSPENSIÓN DE UN AUTOMÓVIL

El amortiguador magneto-reológico RD 1005.3 del que se dispone para realizar los ensayos, ha sido fabricado para la suspensión de los asientos de vehículos de gran tonelaje. Por este motivo, sus dimensiones no son óptimas para acoplarlo en un sistema de suspensión vehicular, por lo que ha sido necesaria su adaptación al vehículo automóvil. La figura 4.1 muestra el amortiguador magneto-reológico RD 1005.3 de Lord. Las especificaciones del amortiguador magneto-reológico RD 1005.3 se encuentran en el Anexo A.



Figura 4.1. Amortiguador magneto-reológico Rd-1005.3

Para instalar el amortiguador magneto-reológico RD 1005.3 en el vehículo automóvil, se ha tomado como base un amortiguador deportivo de la marca Bilstein, en concreto el modelo *sprint* de la gama B8. La figura 4.2 muestra la carcasa de dicho amortiguador [24].



Figura 4.2. Carcasa de un amortiguador Bilstein

4.2.3 DISEÑO Y MONTAJE DE ELEMENTOS AUXILIARES

INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS CAD

Para poder conseguir un diseño preciso sin necesidad de recurrir a los costosos prototipos, se utilizan los programas de diseño asistido por ordenador, *CAD* (acrónimo en inglés *Computer Aided Design*). Con esta herramienta se pretende obtener una modelización exacta del espacio disponible en la colocación del amortiguador, así como, el diseño y/o modificación de las piezas necesarias para adaptar el amortiguador magneto-reológico a las características del vehículo [26, 27, 28].

El diseño y la fabricación asistidos por ordenador (*CAD/CAM*) es una disciplina que estudia el uso de sistemas informáticos como herramienta de soporte en todos los procesos involucrados en el diseño y la fabricación de cualquier tipo de producto. Esta disciplina se ha convertido en un requisito indispensable para la industria actual que se enfrenta a la necesidad de mejorar la calidad, disminuir los costes y acortar los tiempos de diseño y producción.

Se entiende por sistema *CAD*, el uso de sistemas informáticos en la creación, modificación, análisis u optimización de un producto siendo la función principal en estas herramientas la definición de la geometría del diseño (pieza mecánica, arquitectura, circuito electrónico, etc.).

Las herramientas de *CAD* abarcan desde herramientas de modelado geométrico hasta aplicaciones a medida para el análisis u optimización de un producto específico. Entre estos dos extremos se encuentran herramientas de modelado y análisis de tolerancias, cálculo de propiedades físicas (masa, volumen, momentos, etc.), modelado y análisis de elementos finitos, ensamblado, etc.

El éxito en la utilización de sistemas *CAD* radica en la reducción de tiempo invertido en los ciclos de exploración, fundamentalmente, por el uso de sistemas gráficos interactivos, que permiten realizar las modificaciones en el modelo y observar inmediatamente los cambios producidos en el diseño.

El desarrollo de un sistema *CAD* se basa en la representación computacional del modelo. Esto permite realizar automáticamente el dibujo de detalle y la

documentación del diseño, y posibilita la utilización de métodos numéricos para realizar simulaciones sobre el modelo, como una alternativa a la construcción de prototipos.

MONTAJE DEL AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

Para llevar a cabo el montaje del amortiguador magneto-reológico sobre la base del amortiguador BILSTEIN, se han diseñado y fabricado diversos elementos. Algunos de estos elementos evitan las holguras entre el amortiguador magneto-reológico y la carcasa Bilstein, mientras que otros permiten salvar la diferencia de altura existente entre el amortiguador convencional y el magneto-reológico, ya que la longitud del vástago en extensión de este último es más pequeña, concretamente mide 100 mm. El conjunto de elementos que evita dicha diferencia de altura está formado por tres piezas: un soporte con un agujero pasante y uno roscado, que servirá de nexo con el amortiguador magneto-reológico (figura 4.3); un macho roscado, que unirá la pieza anterior con la copela (figura 4.4); y un bulón, útil para unir el soporte anterior con el amortiguador (figura 4.5). Por último, la figura 4.6 muestra la vista isométrica del conjunto montado sobre el amortiguador magneto-reológico.

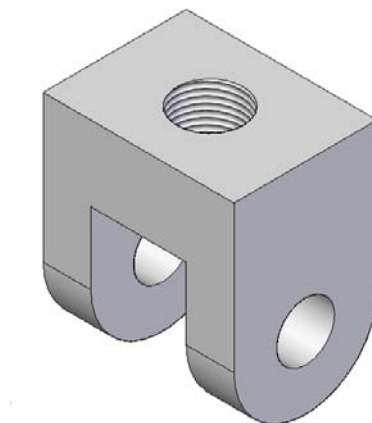


Figura 4.3. Soporte fabricado para amortiguador magneto-reológico

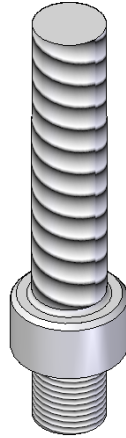


Figura 4.4. Macho roscado fabricado para amortiguador magneto-reológico

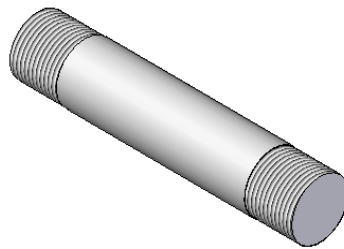


Figura 4.5. Bulón fabricado para amortiguador magneto-reológico

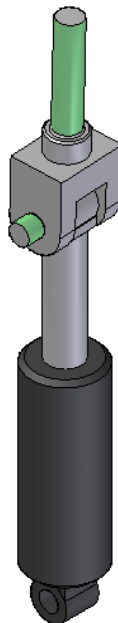


Figura 4.6. Conjunto amortiguador – elemento de unión superior

Para poder incorporar el amortiguador magneto-reológico en la base del amortiguador Bilstein, ha sido necesario realizar varias modificaciones. Primeramente, se han realizado dos taladros diametralmente opuestos para sujetar el amortiguador mediante un bulón roscado pasante. En la figura 4.7 se muestra el diseño de la carcasa del amortiguador BILSTEIN con los taladros realizados.

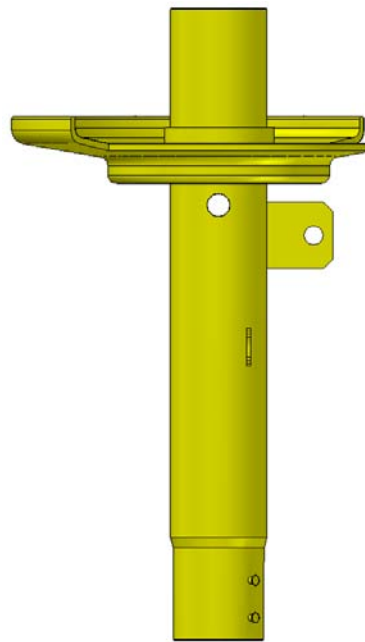


Figura 4.7. Base del amortiguador BILSTEIN

Debido a las holguras existentes, ha sido necesaria la fabricación de un casquillo que, siendo colocado entre la carcasa y el amortiguador, salve dichas irregularidades entre ambos. La figura 4.8 muestra una vista isométrica del casquillo diseñado.

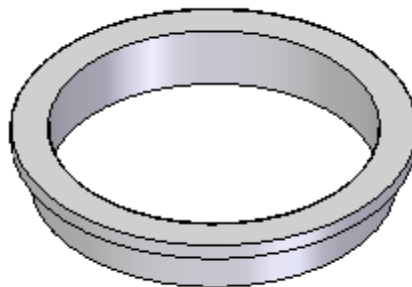


Figura 4.8. Casquillo fabricado para amortiguador magneto-reológico

Una vez realizados los agujeros en la carcasa y el casquillo, se ha procedido al montaje del amortiguador magneto-reológico en la base BILSTEIN. En la figura 4.9 se muestra la vista isométrica de dicho montaje, añadiendo además el muelle helicoidal.

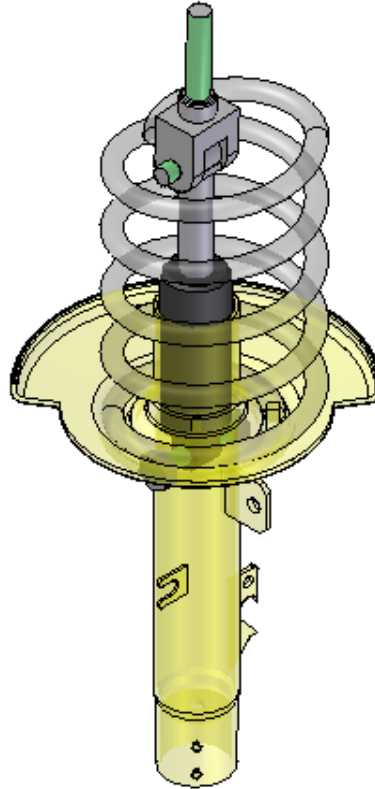


Figura 4.9. Montaje final del amortiguador magneto-reológico

Los planos de las piezas que han sido exclusivamente diseñadas y fabricadas para el montaje del amortiguador magneto-reológico se adjuntan en el Anexo B del presente proyecto.

4.3 INSTALACIÓN DEL AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO EN LA SUSPENSIÓN DEL VEHÍCULO AUTOMÓVIL

Después de realizar el montaje del amortiguador magneto-reológico, se procede a instalarlo en el vehículo de pruebas, proceso en el cual se siguieron los pasos siguientes [29]:

1. Se asegura la completa inmovilidad del vehículo para garantizar la seguridad de los operarios durante el proceso. Para ello, se ha verificado que estaba accionado el freno de estacionamiento del vehículo y se han dispuesto unas cuñas como calzos en las ruedas traseras.

2. Se retira la rueda del vehículo, aflojando los tornillos previamente a la elevación del vehículo para terminar de desenroscarlos cuando la rueda no toca el firme.

3. Se procede a retirar todo el cableado del sistema de frenos para poder trabajar con mayor comodidad y a desatornillar el tornillo que fija el amortiguador de serie a la copela prestando especial atención a la colocación del amortiguador respecto a esta para garantizar la correcta colocación del nuevo amortiguador y evitar así tener que repetir el proceso. La figura 4.10 muestra el conjunto amortiguador en el instante anterior de soltar las sujeciones inferiores a la copela.



Figura 4.10. Conjunto amortiguador sin pinza de freno

4. Es necesario soltar las sujeciones inferiores a la copela del amortiguador. Dado el escaso espacio de maniobra del que se dispone, puede resultar útil emplear llaves de tubo largo o bien extender de la que se dispone mediante tubos de mayor longitud que, aparte de permitir maniobrar desde mayor distancia, reduce la fuerza que es necesaria ejercer para desatornillar (en caso de que los tornillos se encuentren fuertemente apretados).

5. Se extrae el conjunto del amortiguador de su correspondiente abrazadera en el buje. Para ello ha sido necesario tirar hacia abajo del freno de disco, haciendo a su vez palanca en el propio eje del amortiguador. Para facilitar este paso, puede resultar recomendable ayudarse de algún tipo de lubricante específico para este tipo de tareas ya que contribuirá a reducir la fricción entre las piezas. En este paso, se ha prestado especial atención a no dejar caer el disco de freno cuando se consiga sacar el conjunto amortiguador, ya que podría golpearse contra el suelo y dañarse. Para evitarlo, resulta aconsejable disponer un soporte para el mismo.

6. Se ha separado el conjunto amortiguador-muelle de la copela, completando el proceso de extracción del conjunto amortiguador del vehículo (ver figura 4.11).



Figura 4.11. Extracción completa del conjunto amortiguador

7. Se extrae el capuchón de la parte superior del amortiguador, colocando a continuación los compresores de muelle, intentando que alberguen en su interior el mayor número de espirales posible, y se van apretando los dos a la vez hasta que el muelle quede suelto de la arandela superior y se pueda mover libremente. En este apartado, es importante colocar los compresores uno frente al otro y realizar la compresión con sumo cuidado, ya que un fallo podría causar daños y graves problemas.

8. Se quita la tuerca superior que mantiene unido todo el amortiguador. Para ello, es necesario sujetar con una llave de vaso la tuerca y mediante una llave de tipo Allen desenroscar girando en sentido contrario al habitual, ya que de otra manera se hace girar el vástago del amortiguador a la vez y no se puede desenroscar.

9. Tras quitar el tornillo superior ya se puede desmontar el conjunto del amortiguador y proceder a montar el de tipo magneto-reológico en el vehículo. Para ello, se toma el nuevo amortiguador verificando que corresponde al del lado en el cual se quiere montar comparando la posición de soporte para los distintos elementos de anclaje y se hace su montaje individual, empleando de nuevo los compresores del muelle y verificando al final que el muelle quede bien asentado en las muescas de los soportes superior e inferior dispuestos a tal efecto. Finalmente, se aprieta el tornillo superior con un par de 60 Nm aproximadamente.

10. Para iniciar el proceso de montaje del nuevo amortiguador en el vehículo, se colocan las tuercas de la copela apretándolas a mano de tal manera que el amortiguador se sujete sin caer.

11. Se sitúa el eje inferior del amortiguador en la abrazadera del buje, añadiendo fijatornillos en el tornillo de la abrazadera y se aprieta a mano de manera que quede sujeto provisionalmente.

12. Se gira el eje del amortiguador de manera que queden alineados la marca de este (verificando las indicaciones del mismo) y la abertura de la abrazadera donde

va sujeto. Se recomienda a continuación un par de apriete para el tornillo de la abrazadera de 100 Nm.

13. Se colocan de nuevo los cables del sistema de freno (limpiando este último en caso de haberlo tocado con las manos o si está salpicado de alguno de los líquidos empleados en el proceso). En la figura 4.12 se muestra el conjunto del amortiguador magneto-reológico colocado en la suspensión delantera derecha.



Figura 4.12. Amortiguador magneto-reológico montado en la suspensión delantera derecha

14. Finalmente, se coloca la rueda apretando los tornillos a unos 110 Nm y se terminan de apretar los tornillos de la copela prestando atención al par de apriete correcto (30 Nm).

4.4 CALIBRACIÓN E INSTALACIÓN DE SENSORES DE DESPLAZAMIENTO

4.4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS SENSORES DE DESPLAZAMIENTO UTILIZADOS

Los sensores extensiométricos instalados en la suspensión delantera del vehículo, son utilizados para la medición del desplazamiento que experimenta cada amortiguador, tanto el convencional como el magneto-reológico. Dichos sensores corresponden al tipo MTN / E de la serie de transductores industriales de desplazamiento LVDT, los cuales presentan rangos de medición que pueden variar desde $\pm 0,5$ hasta ± 500 mm. Estos sensores están contruidos en acero inoxidable, lo cual les data de extraordinarias características específicas para las condiciones de trabajo más exigentes, incluso en ambientes húmedos o polvorientos. La figura 4.13 muestra el tipo de sensor utilizado para medir el desplazamiento de cada amortiguador [23].



Figura 4.13. Sensor de desplazamiento LVDT MTN / E

La gama de sensores de DC ofrecen señales de salida que varían de 0 a 10 V con un margen de error de $\pm 2,5$ V, así como un cable de salida a 20 mA.

Entre sus características mecánicas destacan la inclusión de núcleo de guiado para la varilla de extensión, la cual incorpora a su vez una rótula para garantizar los grados de libertad posibles. A su vez dispone de otra rótula en el extremo opuesto. En la figura 4.14 se puede observar el plano que describe el sensor.

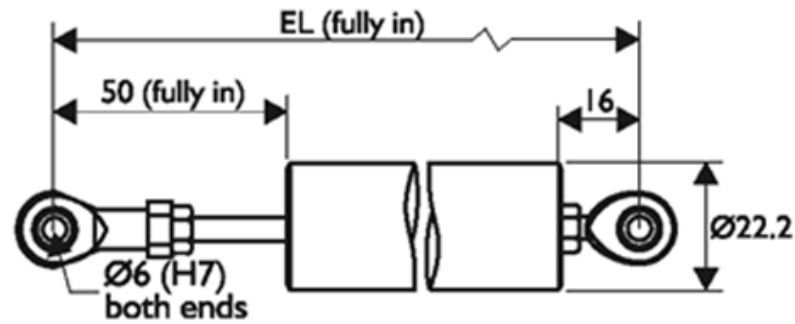


Figura 4.14. Sensor de desplazamiento LVDT MTN / E

La tabla 4.1 recoge los valores de longitud total a sus distintos intervalos de carrera [23].

Tabla 4.1. Relación de la longitud con la carrera del sensor de desplazamiento LVDT

Versiones Salidas DC	
Carrera (mm)	Longitud(mm)
±0.5	196
±2.5	206
±5	231
±10	246
±12.5	276
±15	291
±25	351
±50	436
±75	506
±100	566
±125	616
±150	676
±175	731
±200	816
±250	926
±300	1036
±400	1266
±500	1526

4.4.2 CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES DE DESPLAZAMIENTO

Antes de proceder a la instalación de los sensores de desplazamiento, es necesario realizar un estudio completo sobre la linealidad de respuesta que presentan estos sensores. Para ello, se han realizado medidas de su variación de voltaje entre 0 y 10 V. Dichas medidas se realizan a intervalos de 2 mm tanto en carrera de extensión como de compresión, obteniendo así un total de 10 medidas para cada intervalo.

Para realizar la respectiva calibración de los sensores se ha determinado el comportamiento de ambos, que responde a la ecuación de una recta en la que las ordenadas son el voltaje (en V) y las abscisas al desplazamiento del sensor (en cm). A su vez, ha sido necesario determinar los errores que afectan a la pendiente (Δm) y a la ordenada en el origen (Δb). Dichos errores han sido calculados comparando, en primer lugar, el error accidental con el error de precisión y tomando el mayor de estos para calcular la desviación estándar (σ) en la toma de datos del voltaje. Este valor introducido en las fórmulas (1) y (2), junto con los correspondientes sumatorios para los valores de la posición relativa del sensor, dan los errores de la pendiente y de la ordenada en el origen, respectivamente:

$$\Delta m = \sqrt{\frac{n\sigma^2}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}} \quad (1)$$

$$\Delta b = \sqrt{\frac{\sigma^2 \sum x_i^2}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}} \quad (2)$$

La tabla 4.2 contiene los datos de voltaje relativos al sensor de desplazamiento colocado en la suspensión delantera derecha. La figura 4.15 muestra la linealidad del sensor, la ecuación de la recta y su coeficiente de correlación.

Tabla 4.2. Relación Voltaje/desplazamiento de datos del sensor delantero derecho

Posición (cm) Tensión (V)	0	2	4	6	8	10	12	14	16,5
1ª Medida	10	9,2	8	7	6	4,8	3,9	2,6	1,5
2ª Medida	10	9,1	8,1	7	5,9	4,8	3,8	2,8	1,6
3ª Medida	10	9,2	8	7	5,9	4,9	3,9	2,7	1,5
4ª Medida	10	9,1	8,1	6,9	5,9	4,8	3,7	2,8	1,6
5ª Medida	10	9,2	8,1	6,9	5,6	4,8	3,7	2,7	1,6
6ª Medida	10	9,1	8	7	5,9	4,8	3,7	2,7	1,5
7ª Medida	10	9,1	8,1	6,9	5,8	4,8	3,8	2,7	1,7
8ª Medida	10	9,1	8	7,1	5,9	4,8	3,7	2,7	1,6
9ª Medida	10	9,1	8	6,9	5,8	4,8	3,7	2,8	1,7
10ª Medida	10	9,2	8,1	7	5,9	4,8	3,9	2,7	1,6
Valor Medio	10	9,14	8,05	6,95	5,86	4,81	3,78	2,72	1,59

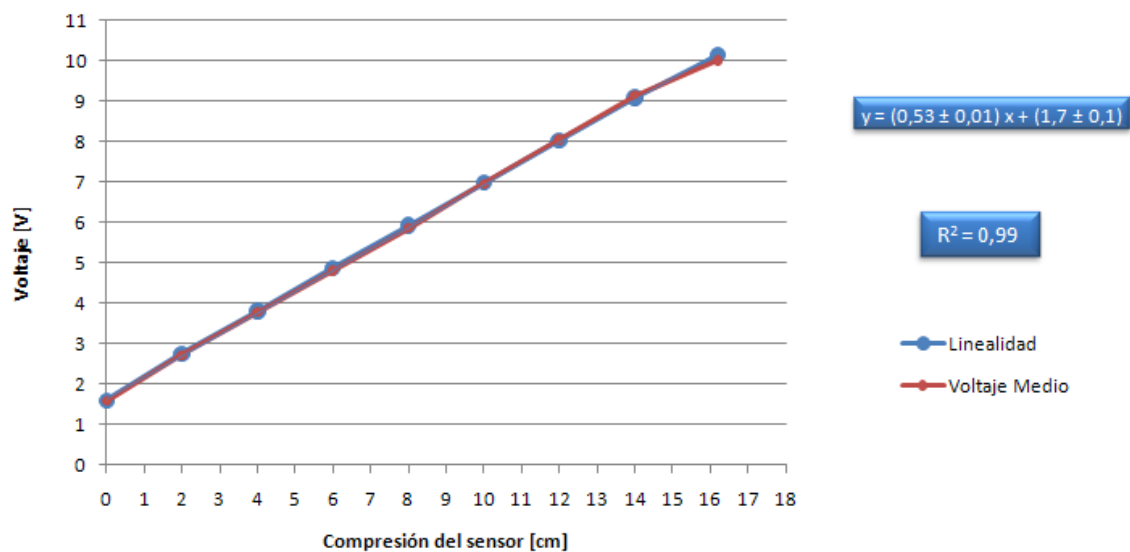


Figura 4.15. Linealidad sensor delantero derecho

De la misma manera, la tabla 4.3 contiene los datos de voltaje relativos al sensor colocado en la rueda delantera izquierda. A su vez, en la figura 4.16, quedan reflejados la linealidad, la ecuación y el coeficiente de correlación.

Tabla 4.3. Relación Voltaje/desplazamiento de datos sensor delantero izquierdo

Posición (cm) Tensión (V)	0	2	4	6	8	10	12	14	16,5
1ª Medida	10	9,3	8,2	7,2	6,1	5	4	2,9	1,6
2ª Medida	10	9,3	8,3	7,1	6,1	5	3,9	3	1,6
3ª Medida	10	9,2	8,2	7,2	6,2	5,1	4	3	1,6
4ª Medida	10	9,3	8,2	7,2	6,1	5	3,9	3	1,6
5ª Medida	10	9,3	8,2	7,3	6,1	5	3,9	2,9	1,5
6ª Medida	10	9,3	8,1	7,3	6,1	5	4	2,9	1,5
7ª Medida	10	9,3	8,3	7,2	6,1	5,2	4,1	3	1,6
8ª Medida	10	9,4	8,3	7,1	6,1	5	4	2,9	1,6
9ª Medida	10	9,3	8,2	7,2	6,1	5	4	2,9	1,6
10ª Medida	10	9,2	8,2	7,2	6,1	5,2	3,9	3	1,6
Valor Medio	10	9,29	8,2	7,2	6,11	5,05	3,97	2,95	1,58

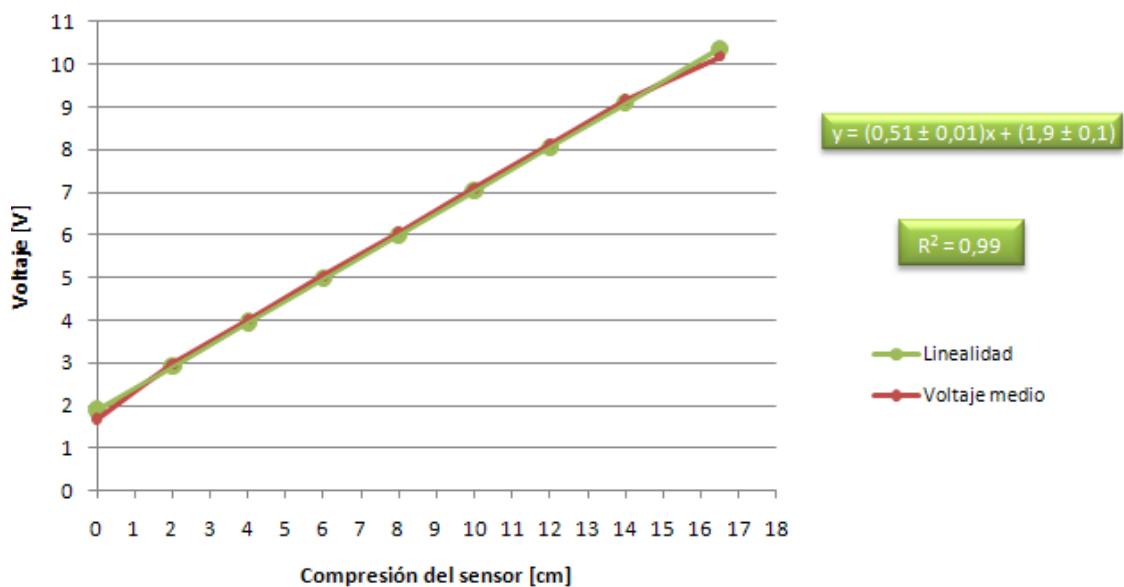


Figura 4.16. Linealidad sensor delantero izquierdo

4.4.3 COLOCACIÓN DE LOS SENSORES DE DESPLAZAMIENTO

El proceso de colocación de ambos sensores de desplazamiento es análogo, tanto en la suspensión derecha como en la izquierda, quedando dispuestos en las posiciones que se muestran en las figuras 4.17 y 4.18, respectivamente, debido a que las grandes dimensiones que los caracterizan no permitían instalarlos de otra manera. En primer lugar, se ha procedido a quitar la rueda, así como el panelado circundante a la misma en todos los bajos del coche, para disponer de mejor visibilidad. Seguidamente, ha sido necesario realizar dos taladros del mismo diámetro, uno de ellos en la parte frontal del trapecio y otro en la chapa situada en la parte inferior de la copela.



Figura 4.17. Sensor de la suspensión derecha



Figura 4.18. Sensor de la suspensión izquierda

Dado el reducido espacio comprendido entre el chasis del vehículo y el latiguillo del freno, ha sido necesario realizar un roscado en el taladro del trapecio para sujetar el espárrago inferior.

Con el objetivo de garantizar el mayor grado de perpendicularidad posible, evitando así ángulos de caída innecesarios, se ha fabricado un tubo en el cual va alojado el espárrago anterior, que soporta el sensor, pasando por la rótula inferior de este (ver figura 4.19). A su vez, la sujeción superior se ha realizado eliminando las holguras mediante arandelas y con un sistema de tuerca y contratuerca (ver figura 4.20).



Figura 4.19. Sujeción inferior sensor



Figura 4.20. Sujeción superior sensor

CAPÍTULO 5

IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE LABVIEW

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se va a explicar el software que se ha desarrollado para gobernar la captación de datos en el momento del ensayo. Dicho software es un derivado del software LabVIEW de National Instruments, llamado LabVIEW SignalExpress 2009, capaz de adquirir, guardar y analizar datos de manera interactiva [30].

Desde una visión general, LabVIEW SignalExpress de National Instruments hace posible el aprendizaje práctico y experimental a través de múltiples disciplinas cubriendo un rango muy amplio de ingenierías (desde biomédica hasta aeroespacial).

LabVIEW SignalExpress presenta además la posibilidad de conectarse y medir desde miles de instrumentos sobre diferentes buses usando una única interfaz. Como supone una plataforma completamente interactiva, los investigadores podrían analizar datos y hacer cambios aunque sus aplicaciones se estén ejecutando. Además, presenta la posibilidad de poder aplicar múltiples análisis al sistema más rápidamente y hacer ajustes de los datos que provienen desde el sensor en tiempo real.

Al brindar LabVIEW SignalExpress una interfaz sencilla, se pueden crear varios informes interactivos (ver figura 5.1), incluyendo, además de texto y tablas, gráficas dinámicas que muestren los datos adquiridos y analizados. Además, se pueden exportar datos a paquetes de análisis como Excel. Asimismo, con sus bases en LabVIEW, se podría extender la investigación hacia campos más concretos y específicos.

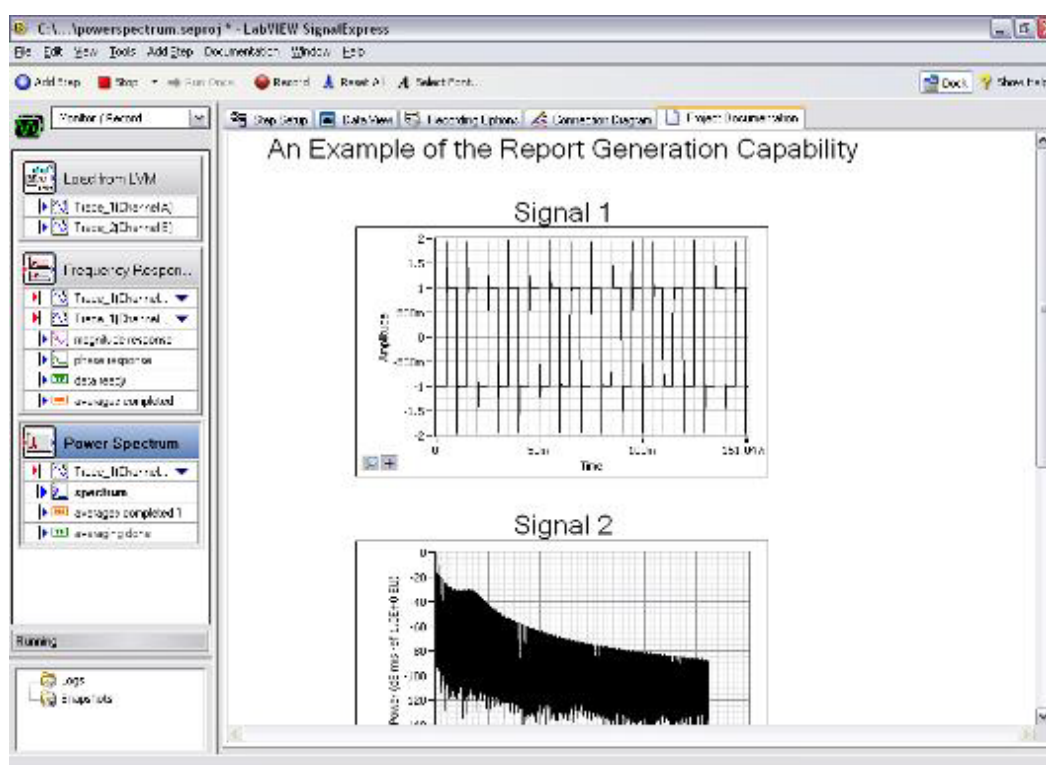


Figura 5.1. Informes interactivos creados en LabVIEW SignalExpress

Como conclusión, se ha elegido LabVIEW SignalExpress para trabajar en este proyecto debido a que, además de cumplir con las necesidades de trabajo del mismo, ya que proporciona la posibilidad de adquirir y guardar datos obtenidos de un sensor externo, permite la opción de profundizar la investigación gracias a sus bases en LabVIEW, como ya se ha comentado al principio de este capítulo. Además, ofrece beneficios que enriquecen la enseñanza, el aprendizaje y el desarrollo de la investigación, y proporciona una interfaz sencilla, intuitiva e interactiva que es más fácil de aprender y usar que otras herramientas académicas.

5.1.1 EQUIPAMIENTO UTILIZADO

El equipo controlador utilizado en el presente proyecto fue adquirido de National Instruments y consta de un chasis capaz de adaptar varios módulos desmontables para la captación de la señal y la alimentación de diversos equipos [30]. El chasis utilizado es el NI PXI 1031DC (ver figura 5.2), que dispone de cuatro ranuras y de dos opciones de entradas, una de 100 a 120 V o 200 a 240 V en corriente alterna (AC) y otra de 11 a 30 V en corriente continua (DC), con un máximo de 30 A de amplitud. El NI PXI 1031DC fue elegido para este proyecto debido a que es una solución ideal para uso portátil, a distancia, o a bordo de vehículos. Las características técnicas del chasis NI PXI 1031DC se muestran en el Anexo A.



Figura 5.2. Chasis NI PXI 1031DC

El primero de los módulos utilizados es el NI PXI 4472B, el cual se muestra en la figura 5.3, y dispone de ocho entradas analógicas muestreadas simultáneamente y optimizadas ante vibración hasta 102.4 kS/s. Esta tarjeta presenta la habilidad de sincronizar hasta 5000 canales en un sistema PXI. Dispone además de un acoplamiento de AC/DC configurable por software con una resolución de 24 bits. Dicho módulo será el responsable de captar las señales procedentes de los sensores en el momento de la medición, para así guardarlas y analizarlas posteriormente. Las características técnicas o especificaciones se adjuntarán en el Anexo A.



Figura 5.3. Módulo NI PXI 4472B

El segundo módulo utilizado es el NI PXI 6230 (ver figura 5.4), el cual será el responsable de alimentar a los sensores, además de dar el voltaje necesario al amortiguador magneto-reológico para que este pueda cambiar sus propiedades en el momento del experimento. El NI PXI 6230 contiene, además de 6 entradas digitales y 4 canales de salida digital, 4 salidas analógicas con una resolución de 16 bits hasta 500 kS/s. Gracias a estas salidas analógicas, este módulo será capaz de realizar las tareas de alimentación a diversos dispositivos como se ha comentado anteriormente. Las especificaciones de este módulo, como con los otros dos PXI's, se detallarán en el Anexo A.



Figura 5.4. Módulo NI PXI-6230

5.2 LABVIEW SIGNALEXPRESS 2009

Después de realizar una breve introducción del software y de los equipos utilizados para la realización del presente proyecto al comienzo de este apartado, a continuación, se explicará el uso y el espacio de trabajo del LabVIEW SignalExpress 2009 mediante un ejemplo de adquisición y almacenamiento de una señal cualquiera [31]. En la figura 5.5 se muestra el espacio de trabajo del LabVIEW SignalExpress 2009.

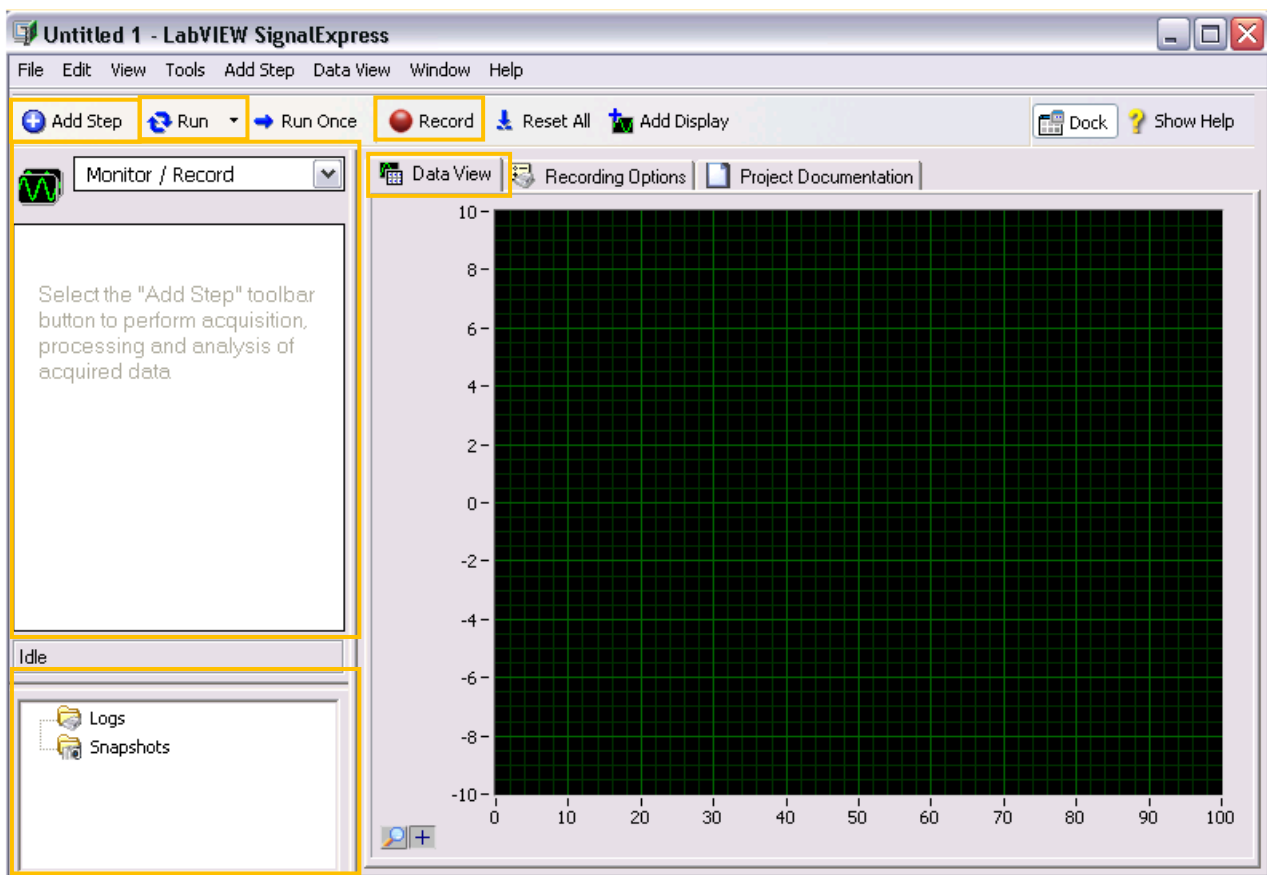


Figura 5.5. Espacio de trabajo de LabVIEW SignalExpress 2009

El cuadro que engloba la pestaña de *Monitor / Record*, mostrará todos los pasos del proyecto en cuestión y proporcionará el acceso a los datos adquiridos y analizados. En cuanto a la pestaña de *Data View*, es donde se podrán ver y analizar todos los datos adquiridos. Por otra parte, en el cuadro que se encuentra en la parte inferior izquierda, se almacenarán todos los datos y se proporcionarán los accesos de estos. Observando la parte superior izquierda, la pestaña de *Add Step* ofrece la posibilidad de desplegar el

submenú que se muestra en la figura 5.6. Justo a la derecha de la pestaña *Add Step* se encuentra la pestaña *Run*, cuya función es determinar el comienzo de la adquisición de la señal. Por último, en el centro de la pantalla aparece la pestaña *Record*, cuya función es guardar cada señal que se adquiere.

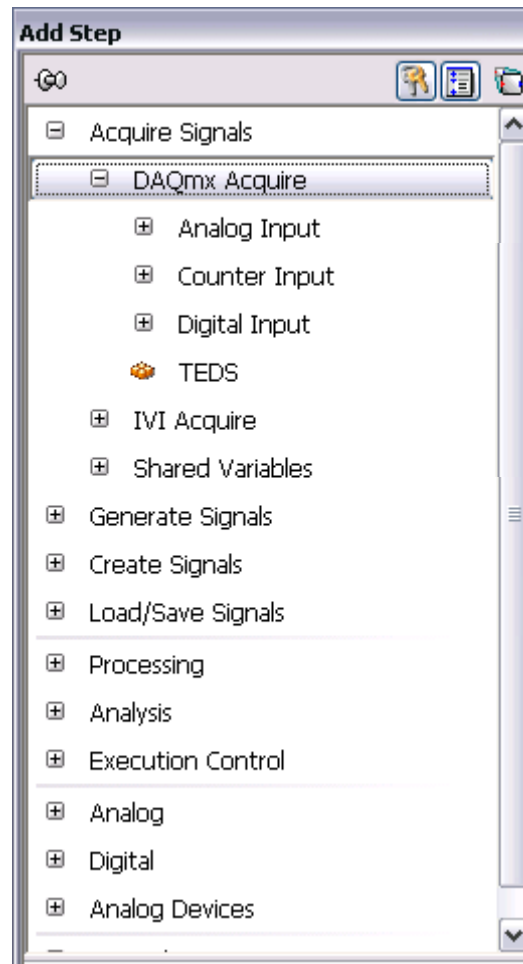


Figura 5.6. Submenú de la pestaña *Add Step* de LabVIEW SignalExpress 2009

El submenú que se muestra en la figura 5.6 ofrece la posibilidad de adquirir, generar, crear y salvar cualquier señal. También permite procesar y analizar dicha señal. Por último, se observa que además LabVIEW SignalExpress distingue entre señal analógica y digital. Profundizando en el desplegable que se muestra en dicha figura, se obtendría un campo de trabajo familiar al que se muestra en la figura 5.7, donde se observa un ejemplo de adquisición de una señal cualquiera, en este caso aceleración, únicamente pulsando el botón *Run* explicado en el párrafo anterior.

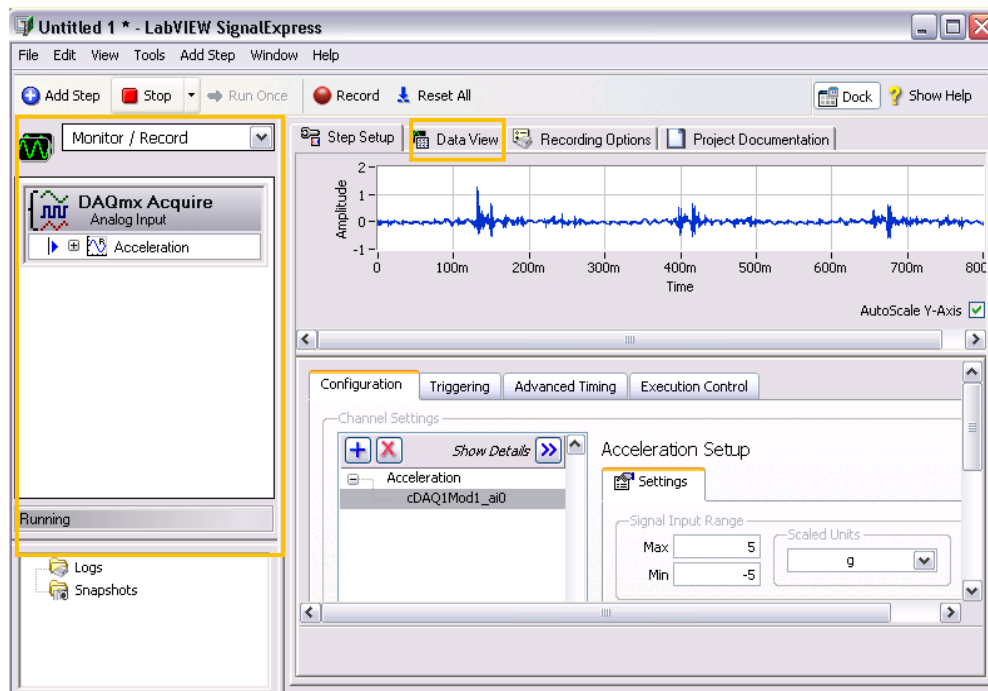


Figura 5.7. Ejemplo de adquisición de señal en LabVIEW SignalExpress 2009

En el ejemplo mostrado en la figura 5.7, se observa cómo pinchando en *Run* el programa inicia la adquisición de señal. Para llevar dicha información al campo de trabajo inicial (figura 5.5), basta únicamente con pulsar la pestaña de *Data View* y arrastrar la información que aparezca en la pestaña *Monitor / Record* (recuadrada en la parte izquierda de la imagen anterior) hacia el cuadro de medidas. En la figura 5.8 se muestra la información ya recogida y almacenada en el campo de trabajo inicial.

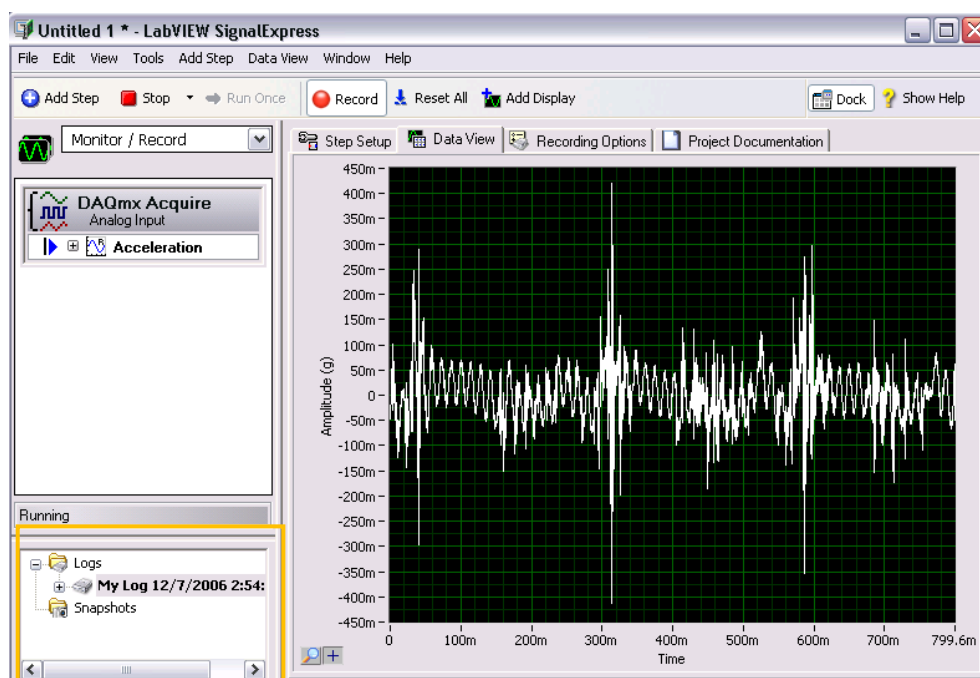


Figura 5.8. Ejemplo de almacenamiento de la señal en LabVIEW SignalExpress 2009

CAPÍTULO 6

DESARROLLO PRÁCTICO Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

6.1 INTRODUCCIÓN

Como se ha explicado en los capítulos 4 y 5, para la realización de las medidas que exige dicho proyecto se ha necesitado la instalación y posible calibración de los diversos equipos y dispositivos que se citan a continuación:

- Sensores de desplazamiento LVDT tipo MTN / E de la serie de transductores industriales.
- Equipo Controlador PXI de National Instruments.
- Amortiguador magneto-reológico RD.1005-3 de Lord.
- Pantalla de ordenador, teclado y ratón para visualizar y analizar los datos obtenidos en las mediciones.

El estudio del amortiguador magneto-reológico precisa de varios ensayos con diferentes obstáculos a distintos niveles de voltaje (entre 0 y 10 V) del amortiguador, es decir, a diferentes niveles de dureza. Los ensayos se han realizado dentro del campus de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, variando entre terreno adoquinado, badén y escalón. Cada ensayo se ha realizado bajo cinco niveles diferentes de voltaje del amortiguador, 0, 2.5, 5, 7.5 y 10 V. Para el ensayo en terreno adoquinado, también se ha variado el nivel de velocidad, realizando medidas a 20, 30 y 40 km/h.

6.2 ALIMENTACIÓN DE LOS EQUIPOS EN EL VEHÍCULO

La alimentación de los equipos citados anteriormente es diferente para cada uno de ellos. El equipo controlador de PXI's está alimentado directamente por la batería del propio vehículo, ya que el equipo necesita una corriente que se encuentre entre 11 y 30 V y esta facilita 12 V. El teclado y el ratón están conectados al chasis de National Instruments vía USB. En cuanto a los sensores, ya se explicó en el capítulo 5 que iban a ser alimentados por el módulo NI PXI 6230, gracias a las 4 salidas analógicas de las que dispone, ocupando cada sensor una salida. La tercera salida del NI PXI 6230 será utilizada para proporcionar de una manera concreta y correctamente calculada el voltaje del amortiguador. La cuarta y última salida quedará sin conectar. En la figura 6.1 se muestra el *pinout* o esquema de las conexiones realizadas en el módulo NI PXI 6230.

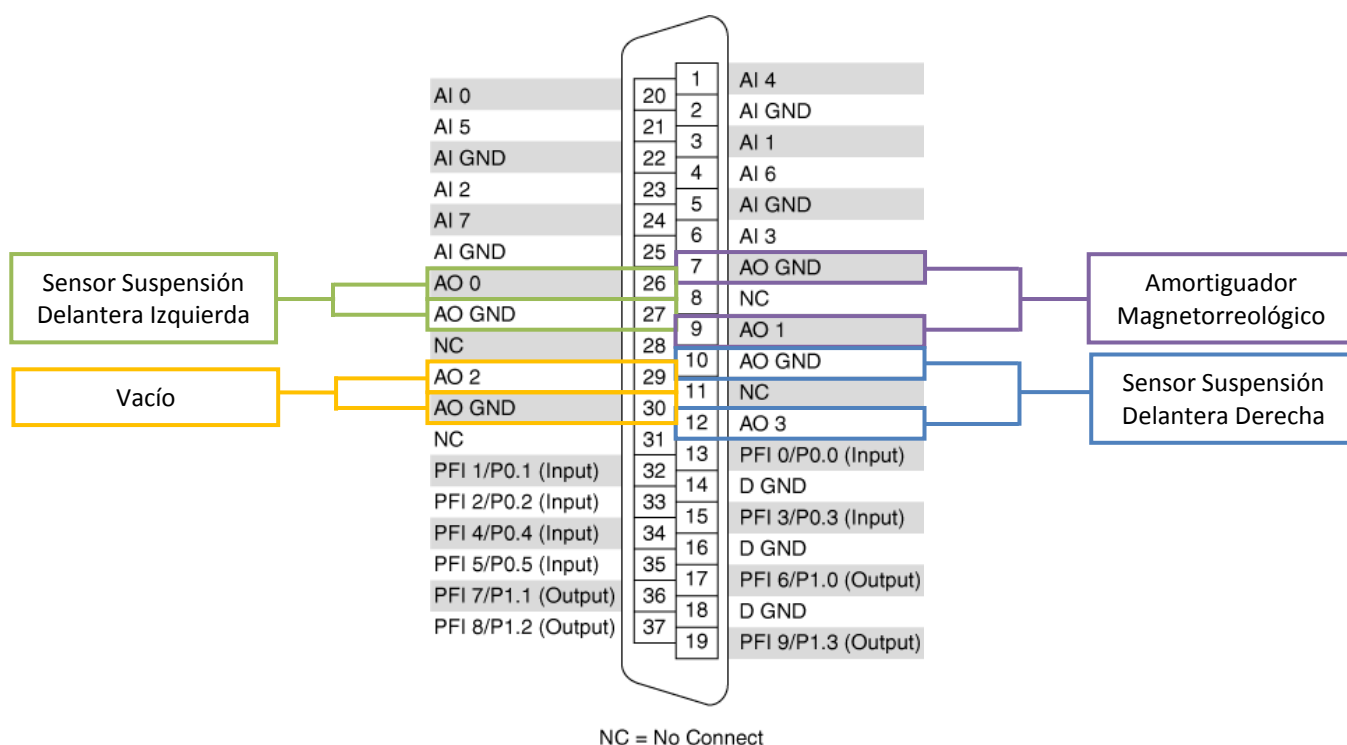


Figura 6.1. Conexiones realizadas en PXI 6230

Por último, la alimentación del amortiguador se ha llevado a cabo con un adaptador para el enchufe del mechero disponible en el vehículo. La pantalla ha sido conectada a la batería del coche, utilizando un transformador de señal de 12 V a 220 V para poder alimentar correctamente la pantalla.

6.3 CONEXIONADO ENTRE EQUIPOS

El conexionado llevado a cabo entre el amortiguador, los dos sensores de desplazamiento y los módulos PXI 6230 y PXI 4472B, sigue el esquema mostrado en la figura 6.2. Para poder regular el voltaje de entrada al amortiguador magneto-reológico digitalmente, se ha conectado su *Kit Controller* al PXI 6230.

Los sensores extensiométricos empleados disponen de tres cables: uno de color azul, otro rojo y otro verde, cuyas especificaciones son:

Azul - 0 V

Rojo - Alimentación (0-10 V)

Verde - Señal

En el caso del sensor de desplazamiento instalado para medir la suspensión delantera derecha, el cableado cumple con el código de colores indicado anteriormente, sin embargo, para el caso del sensor de desplazamiento instalado en la suspensión izquierda, fue necesario empalmar cable para poder guiar el cableado hasta el equipo controlador PXI. Por ello, el código de colores de los cables de señal correspondientes a este sensor es:

Marrón - 0 V

Amarillo - Alimentación

Verde - Señal

Debido a que los sensores de desplazamiento únicamente cuentan con un cable a 0V, ha sido necesario realizar un puentado mediante clemas para poder llevar la misma tierra a la señal y a la alimentación.

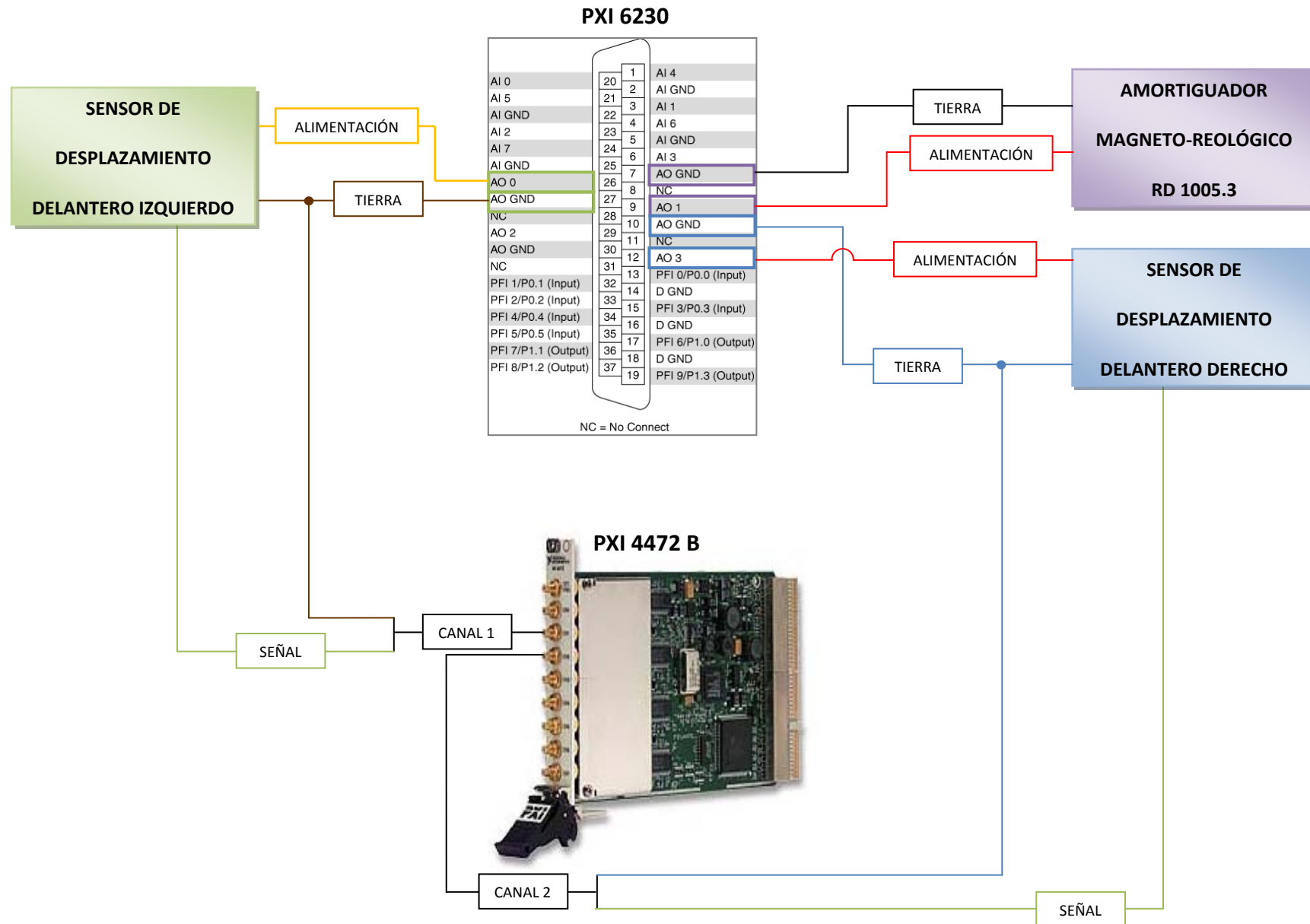


Figura 6.2. Esquema de conexiones realizadas

6.4 UBICACIÓN DE LOS EQUIPOS EN EL VEHÍCULO

En este apartado se explicará la ubicación exacta de los diferentes equipos utilizados en los ensayos, desde el equipo controlador PXI, el regulador de voltaje del amortiguador magneto-reológico, hasta la pantalla destinada a controlar los datos adquiridos.

El equipo controlador PXI se ha colocado en el asiento del copiloto, ya que era un espacio libre dentro del vehículo, además de ser la mejor situación para poder realizar todas las conexiones perfectamente, ya que los cables de conexión de los que disponían los sensores eran demasiado cortos. En la figura 6.3, se muestra la colocación del controlador PXI en el asiento del copiloto en el momento del ensayo.

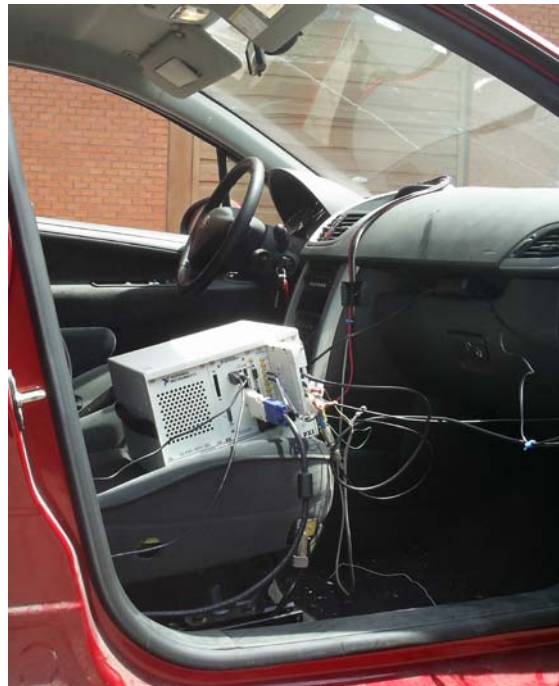


Figura 6.3. Ubicación del equipo controlador PXI

En cuanto al regulador de tensión del amortiguador magneto-reológico, se ha colocado en el lateral derecho de la luna delantera del vehículo, fijándolo correctamente con adhesivo. Dicha colocación es debida a que los cables que unen el amortiguador con su correspondiente regulador eran demasiados cortos, por lo que resulta muy complicado situarlo dentro del vehículo. En la figura 6.4 se muestra la ubicación del regulador de tensión del amortiguador magneto-reológico en el vehículo.



Figura 6.4. Ubicación del regulador de tensión del amortiguador magneto-reológico

Por último, la pantalla destinada a controlar los datos adquiridos, junto con el teclado y ratón pertinentes, han sido ubicados en los asientos traseros del vehículo, ya que es la mejor posición para que la toma de datos de los ensayos sean controladas correctamente por una persona que esté sentada en los asientos traseros. Además, debido a su gran longitud, los diferentes cables de alimentación y conexión con el controlador PXI permitían fácilmente esta ubicación. En la figura 6.5 se muestra la situación de los asientos traseros del vehículo en el momento de los ensayos.



Figura 6.5. Ubicación de la pantalla, el teclado y el ratón en el vehículo

6.5 DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

Para llevar a cabo el estudio del amortiguador magneto-reológico ha sido necesario realizar diferentes ensayos, dependiendo de múltiples factores, como el terreno, la velocidad del vehículo y el valor de la tensión aplicada al amortiguador. A continuación se explicará brevemente cada ensayo realizado.

6.5.1 ENSAYOS REALIZADOS SOBRE TERRENO ADOQUINADO

Cada ensayo realizado sobre terreno adoquinado ha consistido en recorrer una distancia de 100 metros, a una velocidad determinada y con una tensión aplicada al amortiguador. En la figura 6.6 se muestra el terreno adoquinado, así como el recorrido realizado en estos ensayos.



Figura 6.6. Ensayo sobre terreno adoquinado

Las velocidades escogidas han sido 20, 30 y 40 km/h. Para cada valor de la velocidad, se ha variado la tensión del amortiguador en cinco ocasiones, tomando los valores de 0, 2.5, 5, 7.5 y 10 V. La figura 6.7 muestra el esquema que explica dicha distribución para los ensayos en terreno adoquinado. Cada ensayo se ha realizado dos veces, una vez de ida y otra de vuelta del recorrido.

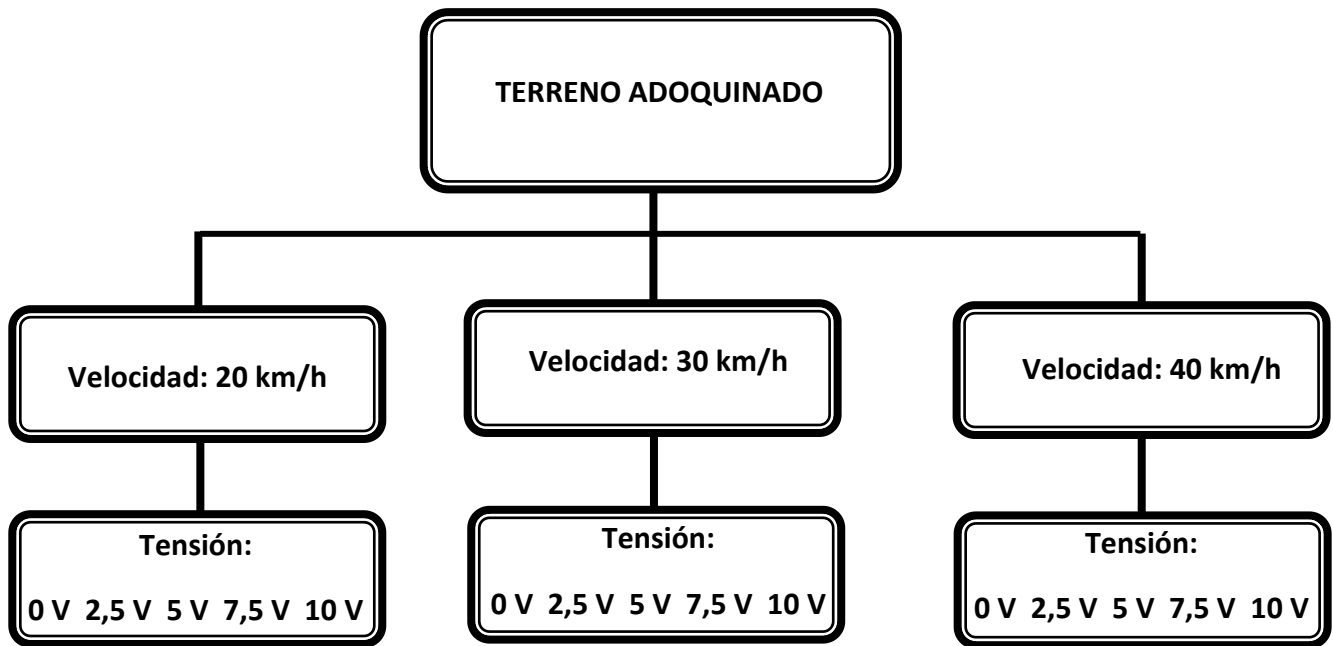


Figura 6.7. Esquema de ensayos sobre terreno adoquinado

6.5.2 ENSAYOS REALIZADOS SOBRE ESCALÓN

Cada ensayo realizado sobre escalón ha consistido en superar el escalón que se muestra en la figura 6.8, en subida y en bajada. La velocidad del ensayo es únicamente 20 km/h, ya que es la velocidad que adoptaría el vehículo en una situación real para superar el escalón. En cuanto a la variación de tensión del amortiguador, se ha seguido el mismo criterio que en el ensayo sobre terreno adoquinado, es decir, se han tomado unos valores de 0, 2.5, 5, 7.5 y 10 V.



Figura 6.8. Ensayo sobre escalón

La figura 6.9 muestra el diagrama que explica el criterio de valores escogido para la realización del ensayo sobre escalón.

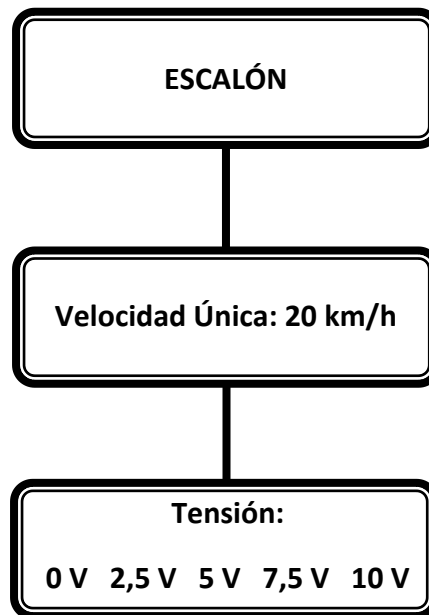


Figura 6.9. Esquema de ensayos sobre escalón

6.5.3 ENSAYOS REALIZADOS SOBRE BADÉN

Los ensayos realizados sobre badén suponen la última toma de datos del estudio objeto de este proyecto. Se ha escogido que el ensayo sobre badén fuese el último, debido a que era el más agresivo para el amortiguador. Dicho ensayo ha consistido en superar dos badenes (véase figura 6.10), separados entre sí una distancia de 15 metros.



Figura 6.10. Ensayo sobre badén

Cada ensayo se ha realizado a una velocidad única de 20 km/h, ya que el vehículo en una situación real adquiriría dicha velocidad para superar un badén de las mismas características. En cuanto a la tensión aplicada al amortiguador, se ha seguido el mismo criterio que en los ensayos anteriores, es decir, tomando valores de 0, 2.5, 5, 7.5 y 10 V. En la figura 6.11 se muestra el diagrama que explica el criterio seguido en los ensayos sobre badén.

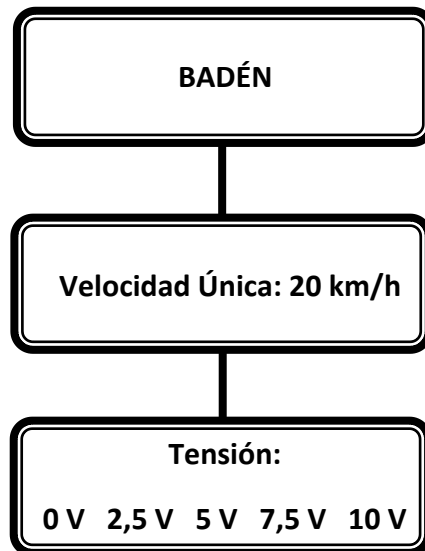


Figura 6.11. Esquema de ensayos en badén

6.6 RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este apartado se estudian los datos obtenidos en los ensayos descritos en el apartado 6.5. Primeramente, se ha realizado un estudio temporal de estos, para adquirir el *Root Mean Square* (RMS). Seguidamente, se ha realizado un estudio en frecuencia, mediante el cual se ha adquirido el *Power Spectral Density* (PSD). Tanto el estudio temporal como el estudio en frecuencia se ven afectados por la generación de ruido a altas frecuencias, por lo que previo a dichos estudios se ha filtrado la señal para eliminar el ruido generado. La figura 6.12 muestra el *Power Spectral Density* genérico afectado por ruido a altas frecuencias.

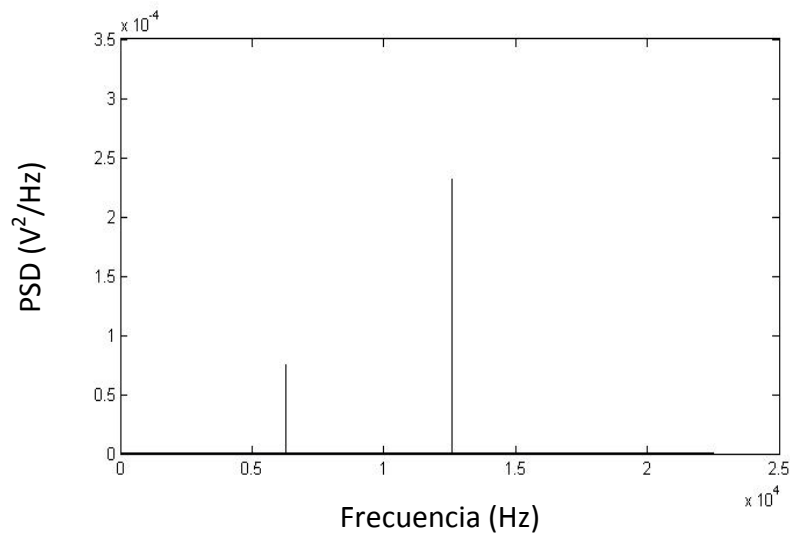


Figura 6.12. *Power Spectral Density* genérico con ruido a altas frecuencias

Para eliminar este ruido se ha aplicado en todos los ensayos un filtro de paso bajo del tipo *Butterflow*. En la figura 6.13 se muestran los valores de la ganancia frente a la frecuencia al aplicar este filtro.

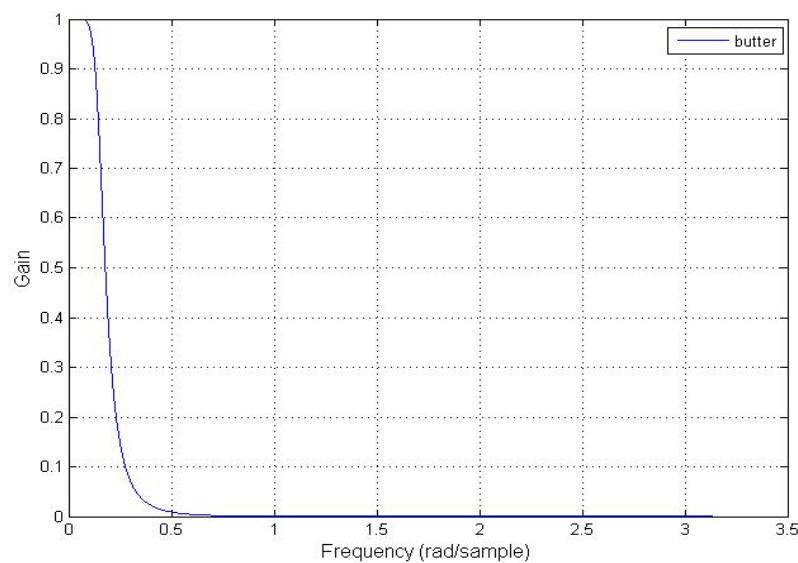


Figura 6.13. Filtro *Butterflow* escogido para eliminar el ruido generado

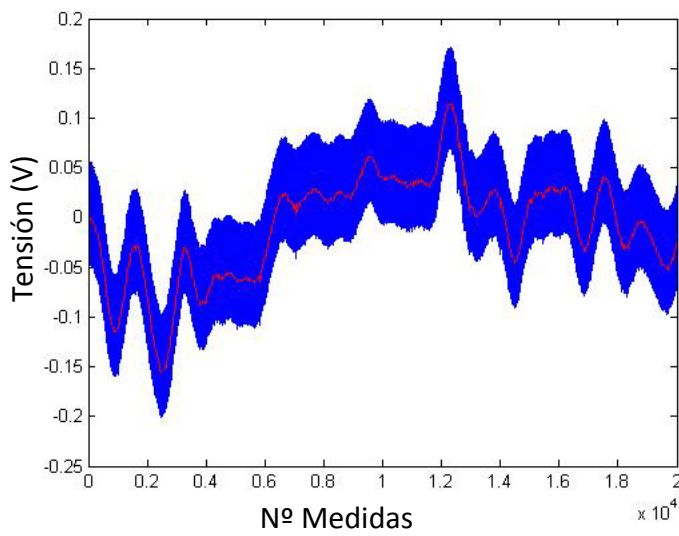
En cuanto a la disposición de los resultados en este capítulo, para cada ensayo se hace una distinción entre los resultados obtenidos para el amortiguador magneto-reológico y para el convencional.

6.6.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE ADOQUINADO A 20 km/h

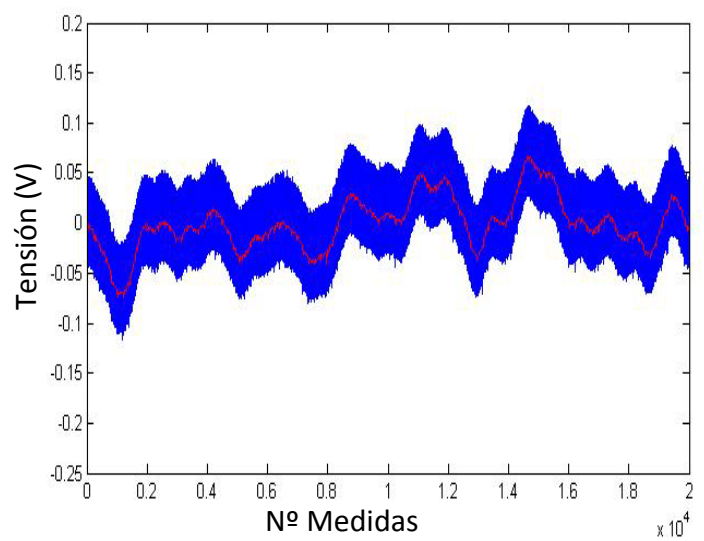
Las figuras 6.14, 6.16, 6.18, 6.20 y 6.22, muestran las lecturas, en voltios, proporcionadas por los sensores de desplazamiento (señal original - color azul, señal filtrada – color rojo) colocados en la suspensión equipada con amortiguador magneto-reológico (a) y con amortiguador convencional (b).

Por otra parte, los resultados que se muestran en las figuras 6.15, 6.17, 6.19, 6.21 y 6.23 corresponden a la respuesta en frecuencia (valores PSD) de las lecturas proporcionadas por los sensores de desplazamiento colocados en la suspensión equipada con amortiguador magneto-reológico (a) y con amortiguador convencional (b).

- Alimentación del amortiguador: 0 V

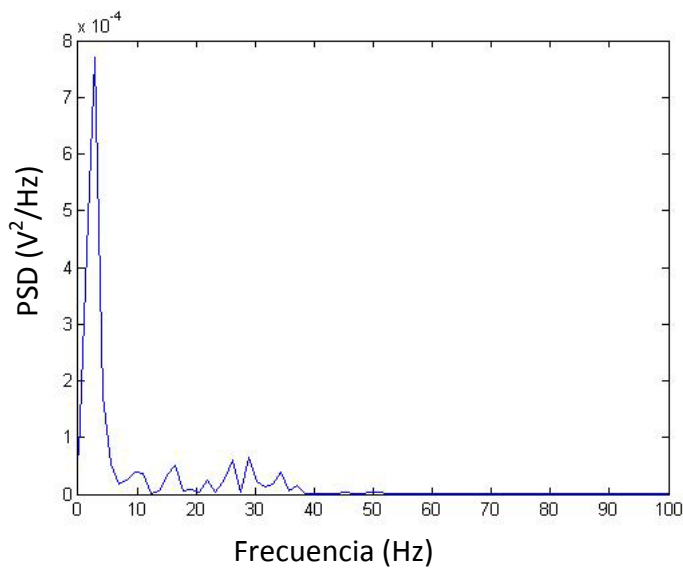


a) Amortiguador magneto-reológico

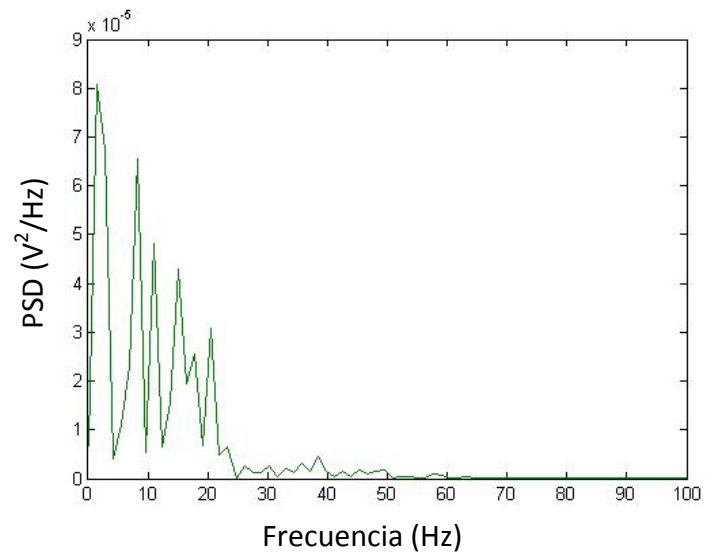


b) Amortiguador convencional

Figura 6.14. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 0 V



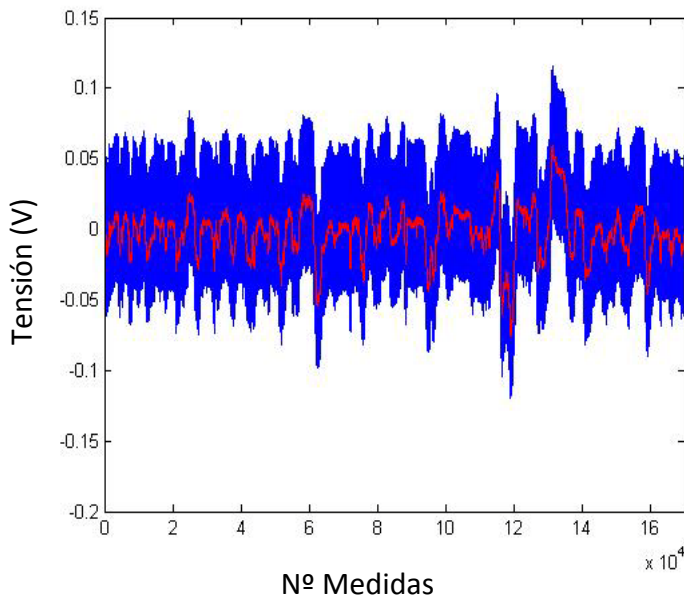
a) Amortiguador magneto-reológico



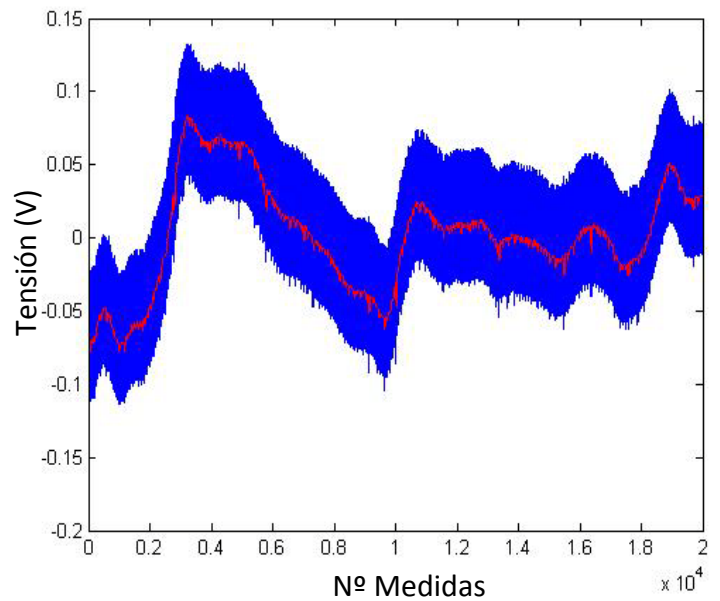
b) Amortiguador convencional

Figura 6.15. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 0 V

- Alimentación del amortiguador: 2,5 V

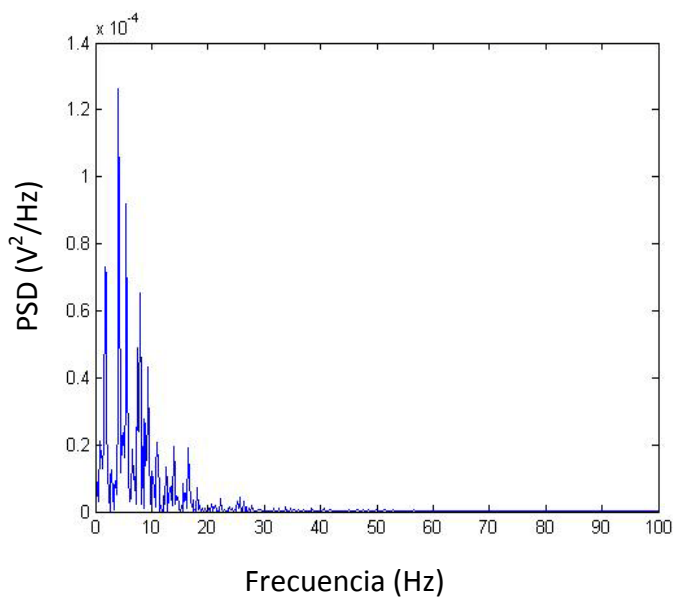


a) Amortiguador magneto-reológico

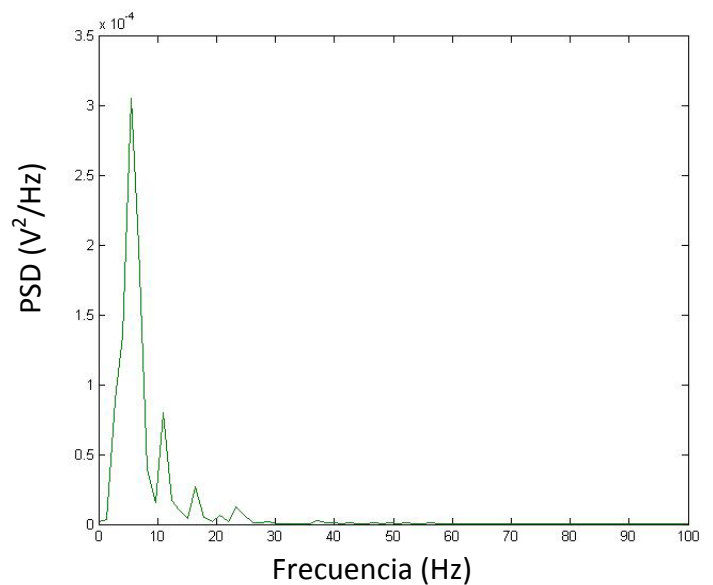


b) Amortiguador convencional

Figura 6.16. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 2.5 V



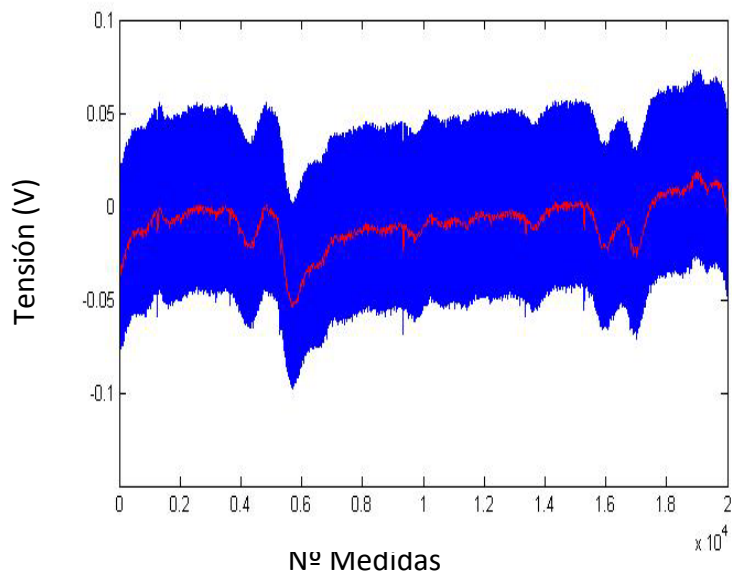
a) Amortiguador magneto-reológico



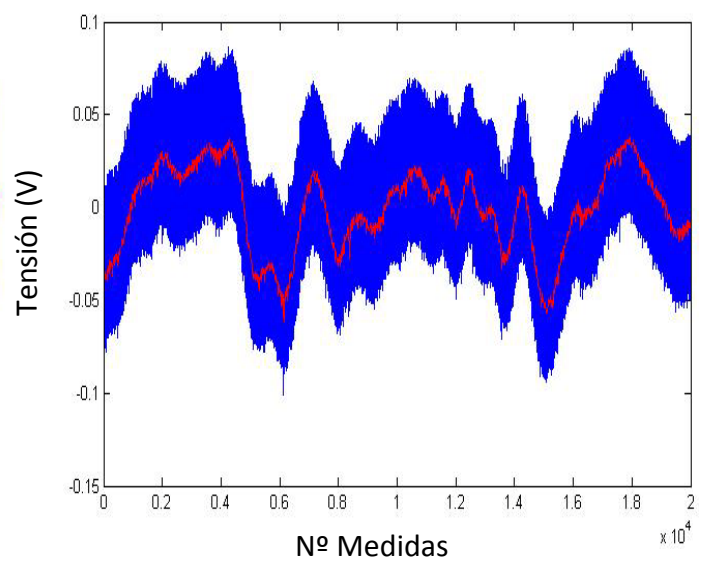
b) Amortiguador convencional

Figura 6.17. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 2.5 V

- Alimentación del amortiguador: 5 V

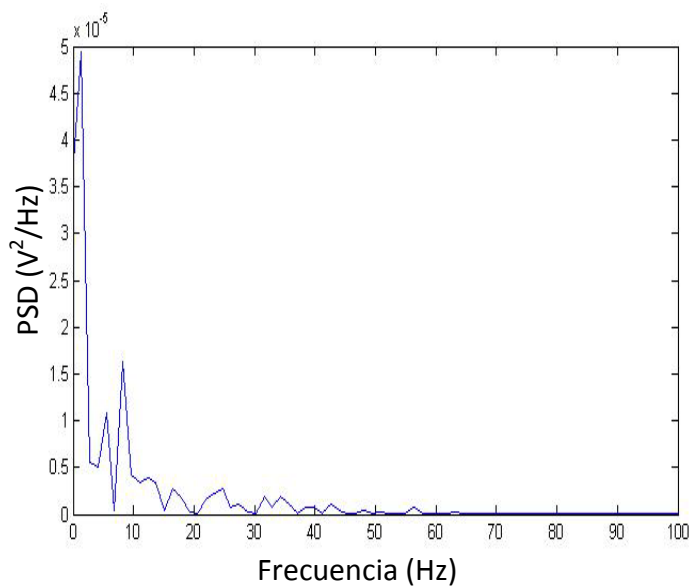


a) Amortiguador magneto-reológico

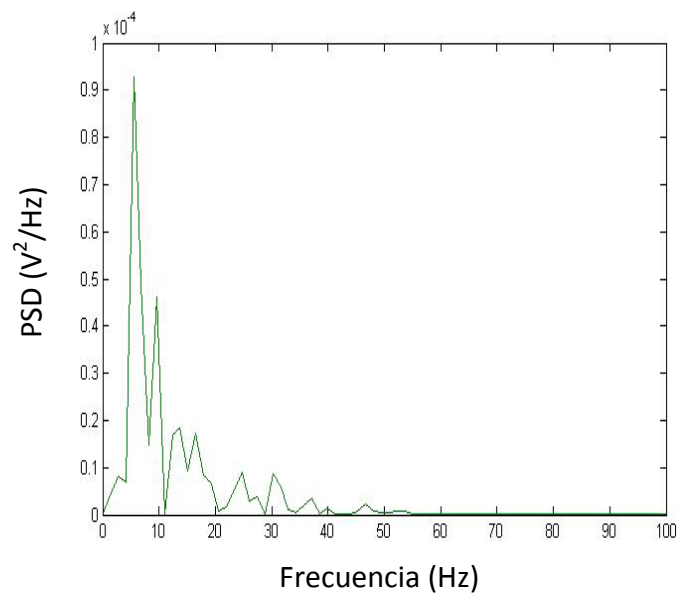


b) Amortiguador convencional

Figura 6.18. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 5 V



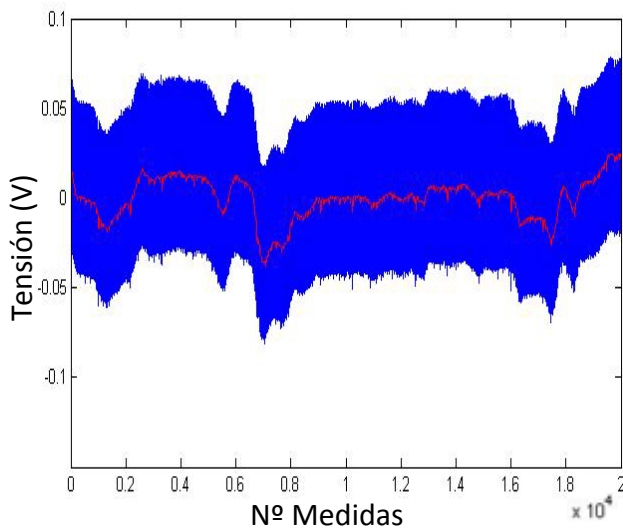
a) Amortiguador magneto-reológico



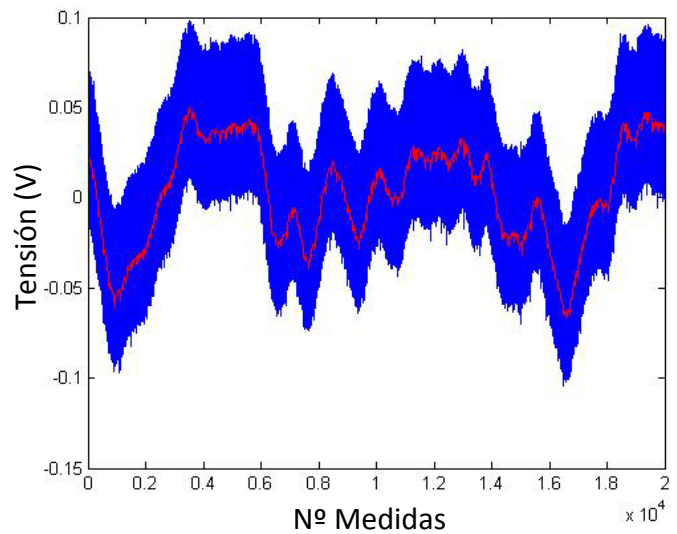
b) Amortiguador convencional

Figura 6.19. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 5 V

- Alimentación del amortiguador: 7,5 V

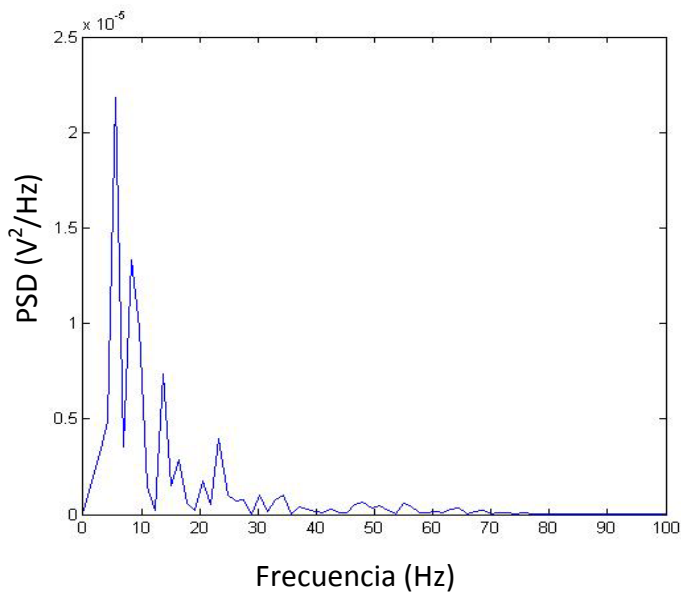


a) Amortiguador magneto-reológico

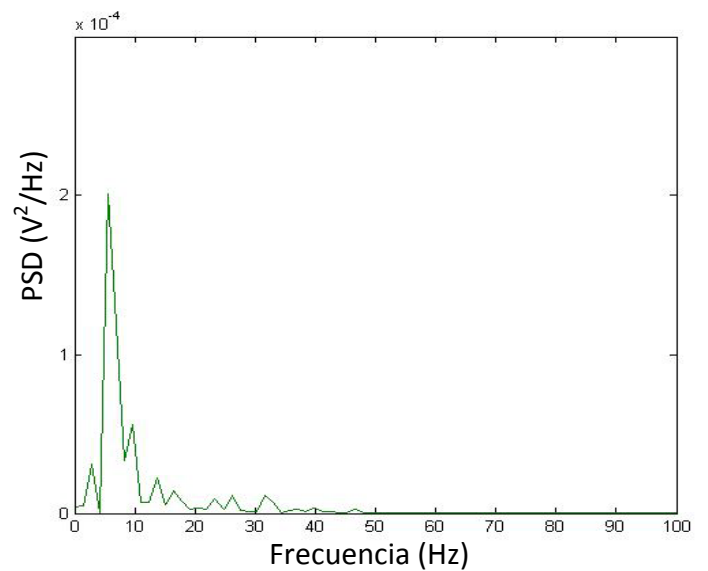


b) Amortiguador convencional

Figura 6.20. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 7.5 V



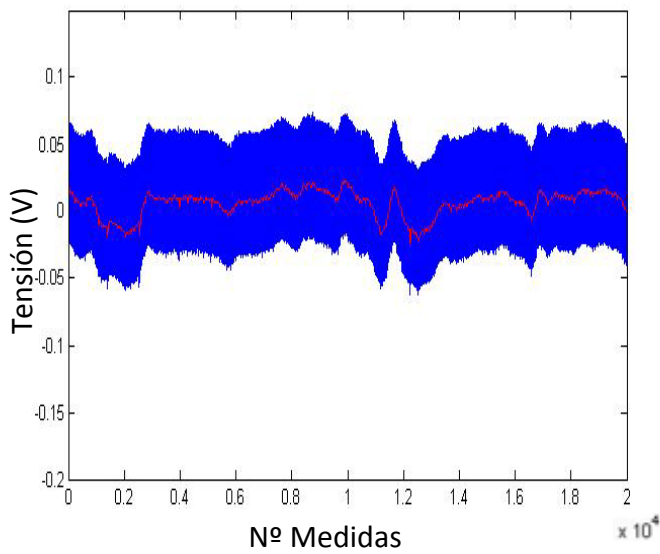
a) Amortiguador magneto-reológico



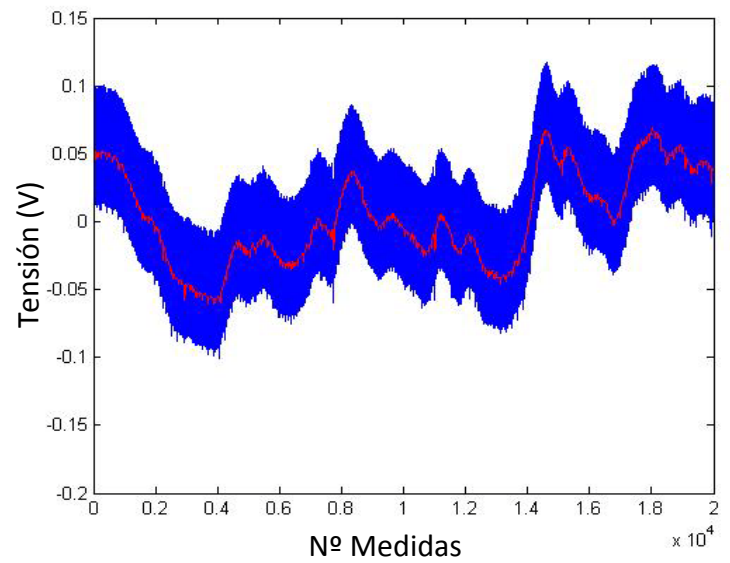
b) Amortiguador convencional

Figura 6.21. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 7.5 V

- Alimentación del amortiguador: 10 V

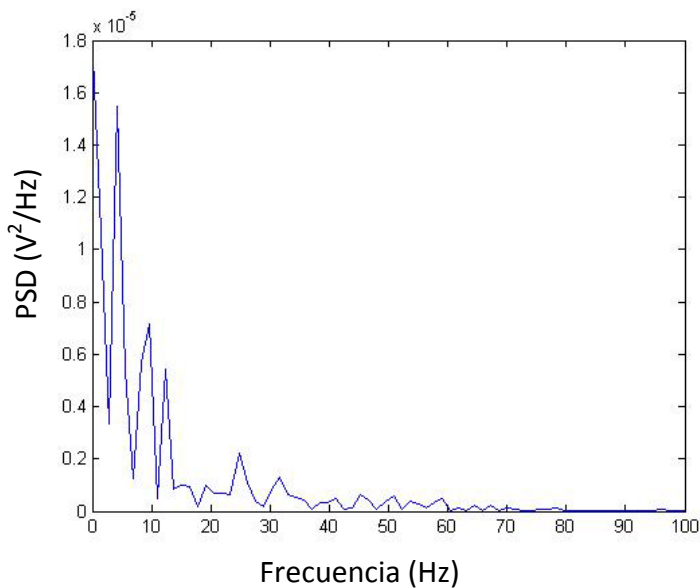


a) Amortiguador magneto-reológico

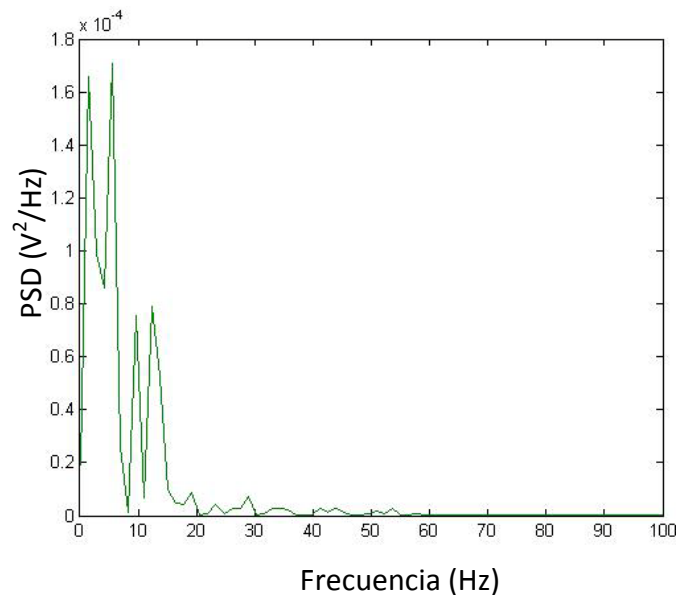


b) Amortiguador convencional

Figura 6.22. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 10 V



a) Amortiguador magneto-reológico



b) Amortiguador convencional

Figura 6.23. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 10 V

- **Valor del *Root Mean Square* (RMS)**

La tabla 6.1 contiene los datos del RMS correspondientes a la lectura del sensor de desplazamiento colocado en la suspensión equipada con amortiguador magneto-reológico, para diferentes valores de tensión de alimentación de dicho amortiguador.

Tabla 6.1. Datos RMS amortiguador magneto-reológico para adoquinado a 20 km/h

RMS (V)	0 V	2.5 V	5 V	7.5 V	10 V
ADOQUINADO 20 km/h	0.0256	0.0171	0.0152	0.0113	0.0114

La tabla 6.2 contiene los datos del RMS correspondientes a la lectura del sensor de desplazamiento colocado en la suspensión equipada con amortiguador convencional, para diferentes valores de tensión de alimentación del amortiguador magneto-reológico.

Tabla 6.2. Datos RMS amortiguador convencional para adoquinado a 20 km/h

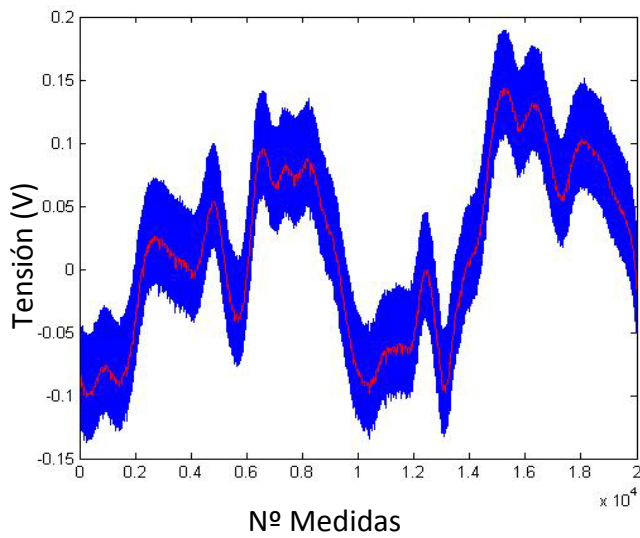
RMS (V)	0 V	2.5 V	5 V	7.5 V	10 V
ADOQUINADO 20 km/h	0.0262	0.0370	0.0222	0.0284	0.0341

6.6.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE ADOQUINADO A 30 km/h

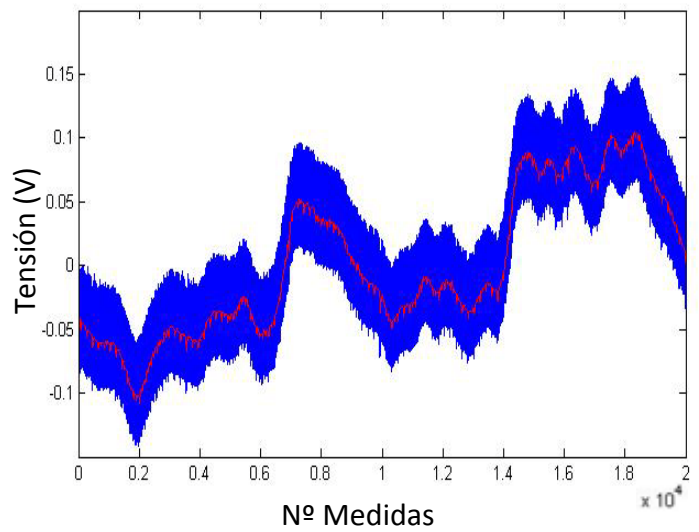
Las figuras 6.24, 6.26, 6.28, 6.30 y 6.32, muestran las lecturas, en voltios, proporcionadas por los sensores de desplazamiento (señal original - color azul, señal filtrada – color rojo) colocados en la suspensión equipada con amortiguador magneto-reológico (a) y con amortiguador convencional (b).

Por otra parte, los resultados que se muestran en las figuras 6.25, 6.27, 6.29, 6.31 y 6.33 corresponden a la respuesta en frecuencia (valores PSD) de las lecturas proporcionadas por los sensores de desplazamiento colocados en la suspensión equipada con amortiguador magneto-reológico (a) y con amortiguador convencional (b).

- Alimentación del amortiguador: 0 V

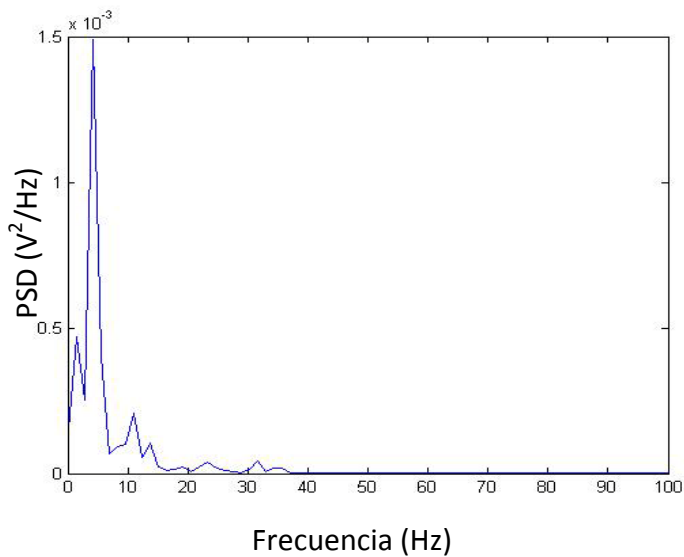


a) Amortiguador magneto-reológico

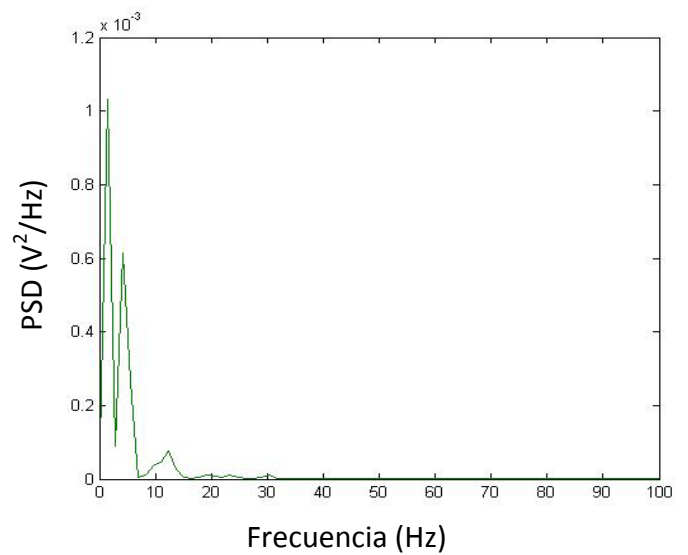


b) Amortiguador convencional

Figura 6.24. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 0 V



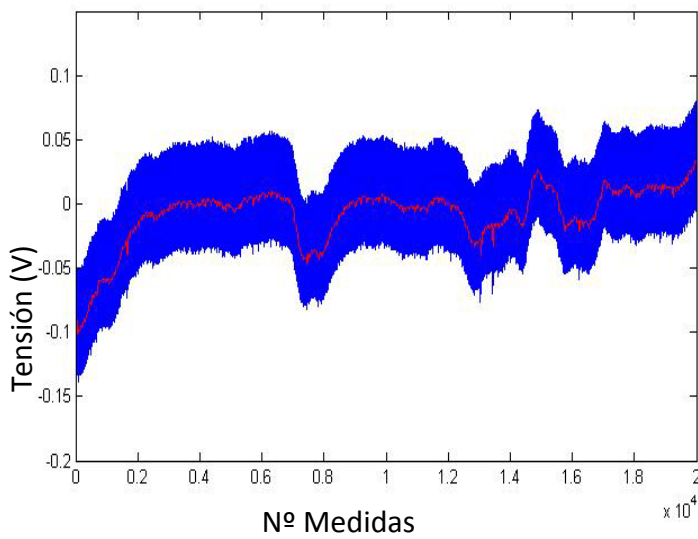
a) Amortiguador magneto-reológico



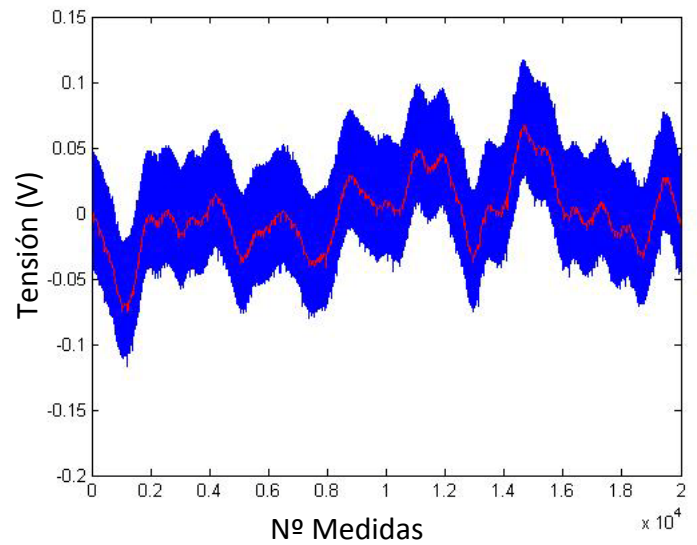
b) Amortiguador convencional

Figura 6.25. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 0 V

- Alimentación del amortiguador: 2,5 V

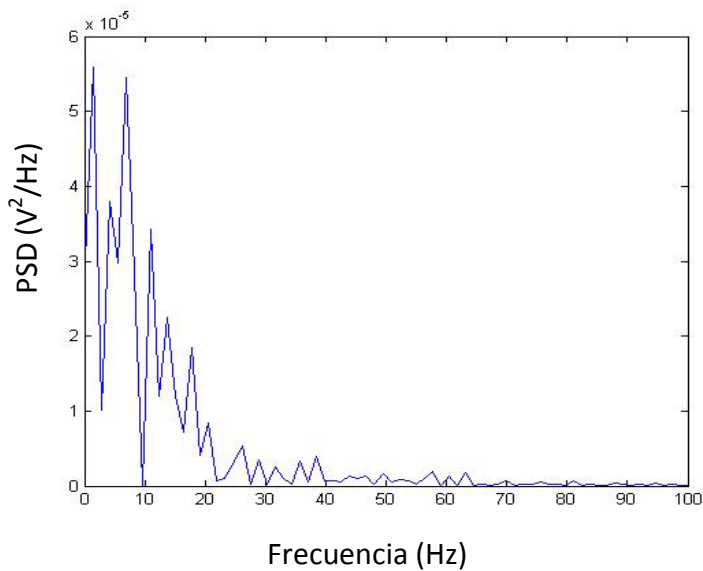


a) Amortiguador magneto-reológico

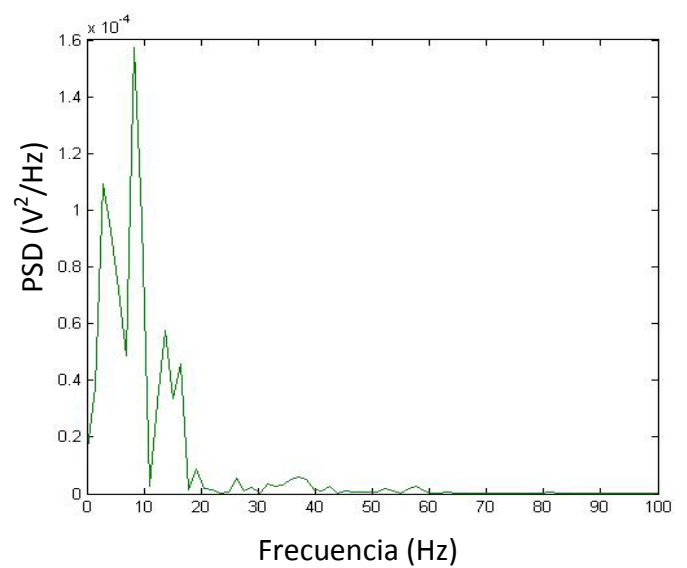


b) Amortiguador convencional

Figura 6.26. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 2.5 V



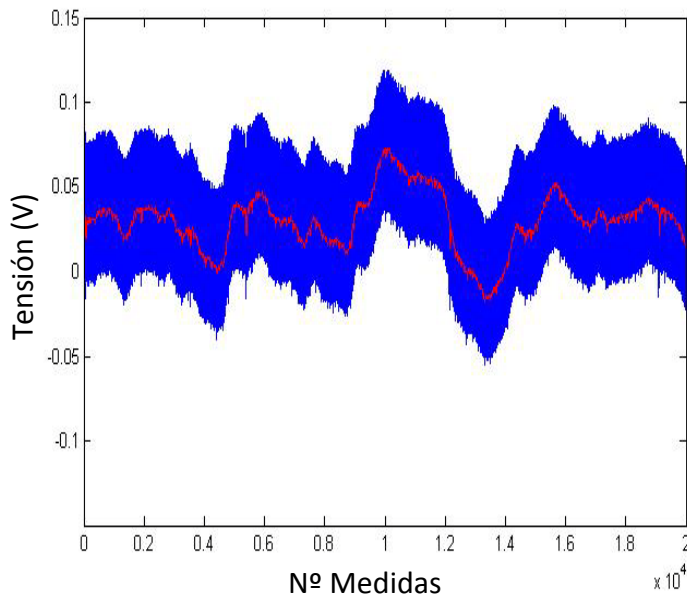
a) Amortiguador magneto-reológico



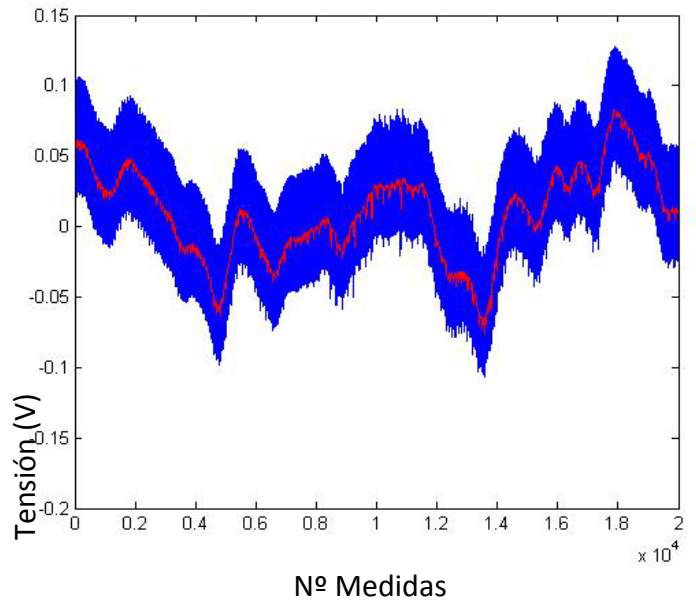
b) Amortiguador convencional

Figura 6.27. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 2.5 V

- Alimentación del amortiguador: 5 V

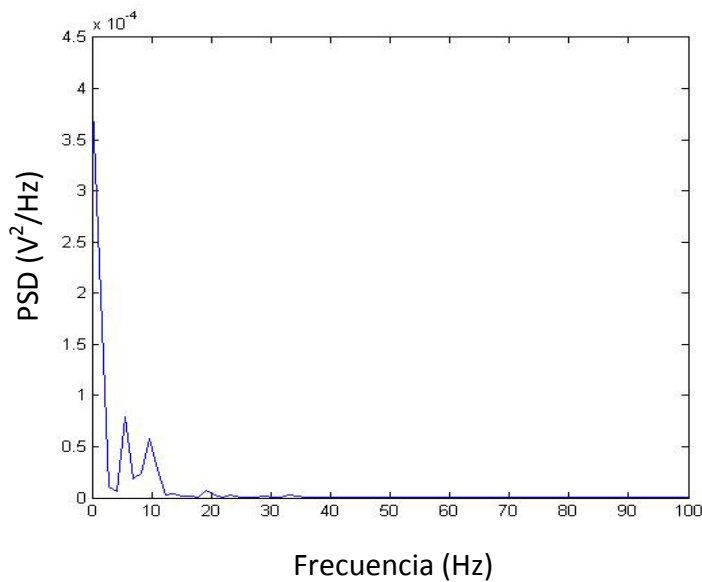


a) Amortiguador magneto-reológico

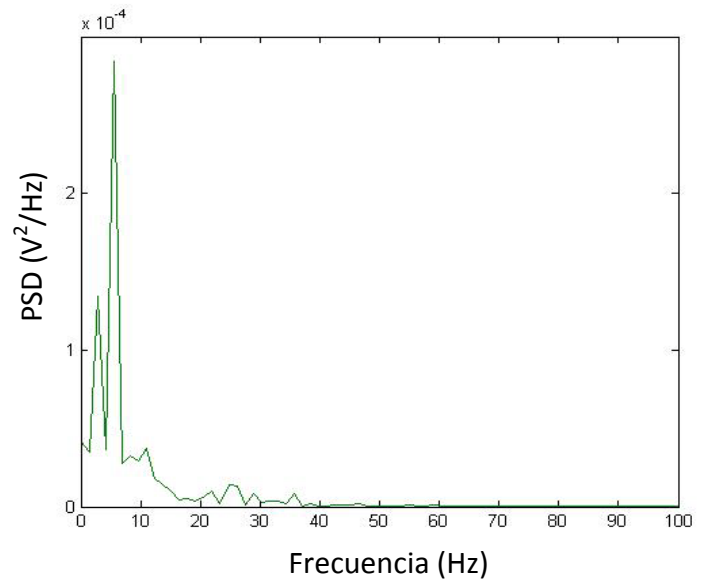


b) Amortiguador convencional

Figura 6.28. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 5 V



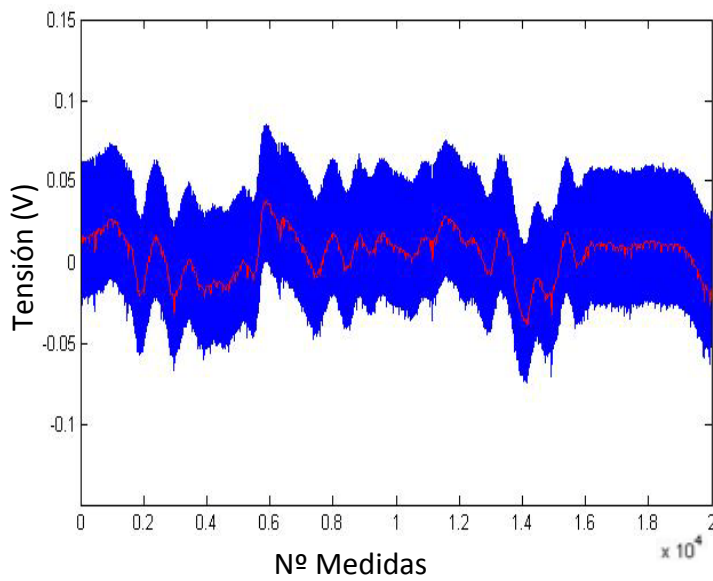
a) Amortiguador magneto-reológico



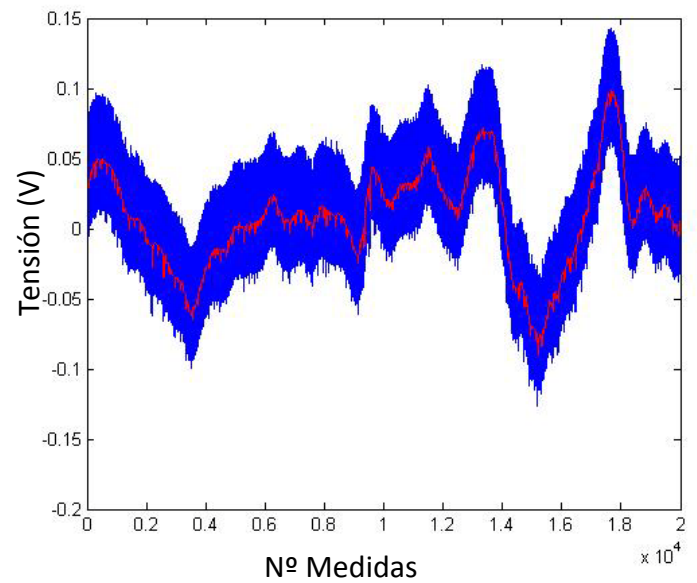
b) Amortiguador convencional

Figura 6.29. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 5 V

- Alimentación del amortiguador: 7,5 V

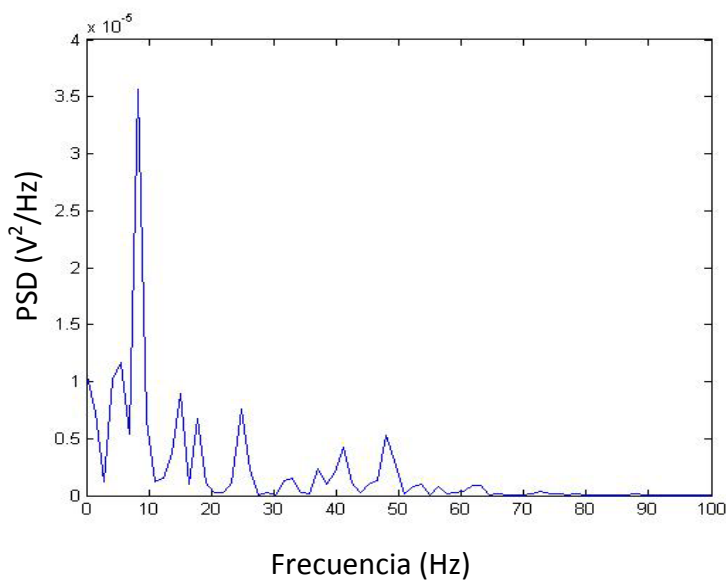


a) Amortiguador magneto-reológico

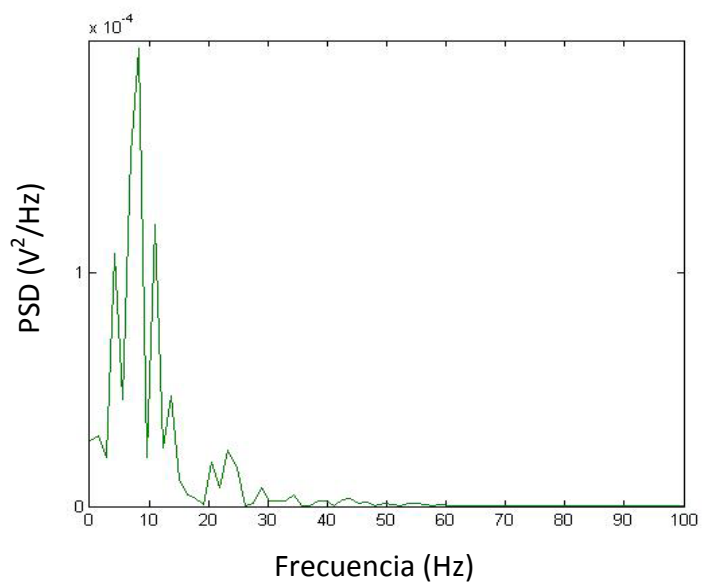


b) Amortiguador convencional

Figura 6.30. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 7.5 V



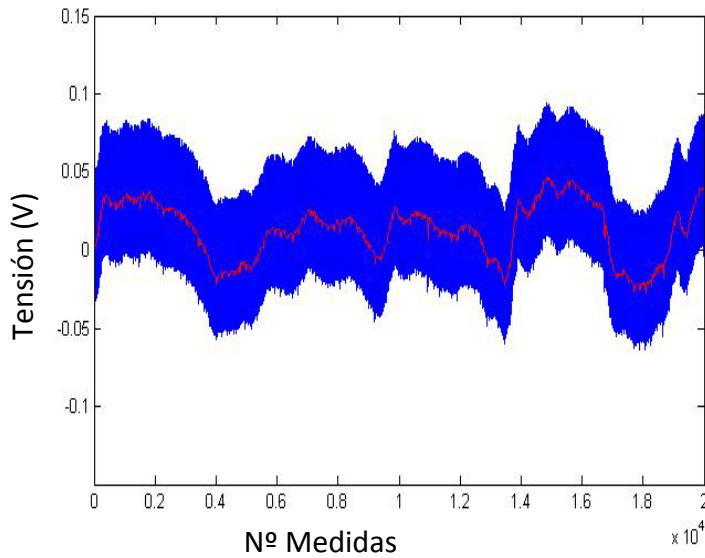
a) Amortiguador magneto-reológico



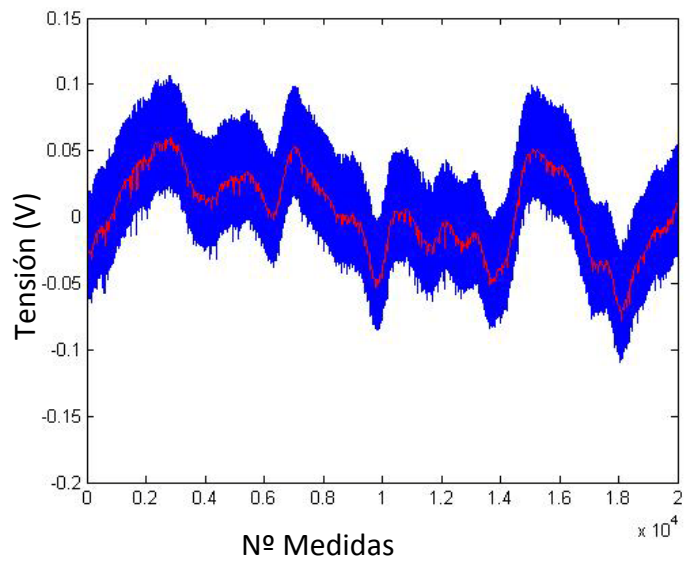
b) Amortiguador convencional

Figura 6.31. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 7.5 V

- Alimentación del amortiguador: 10 V

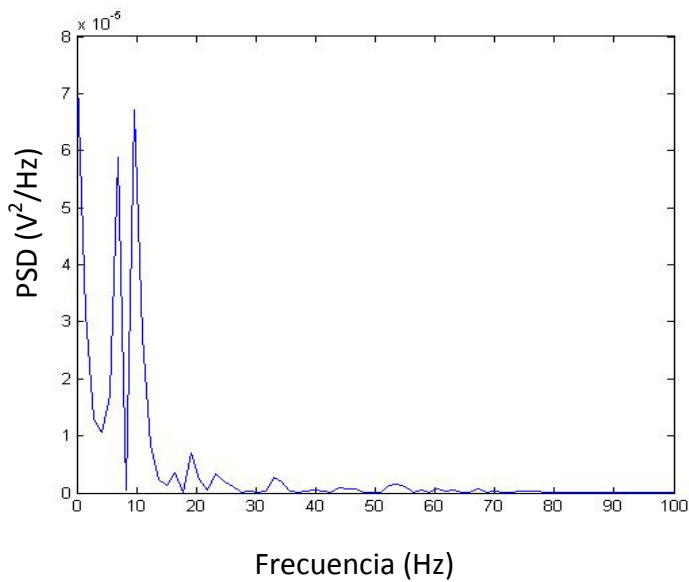


a) Amortiguador magneto-reológico

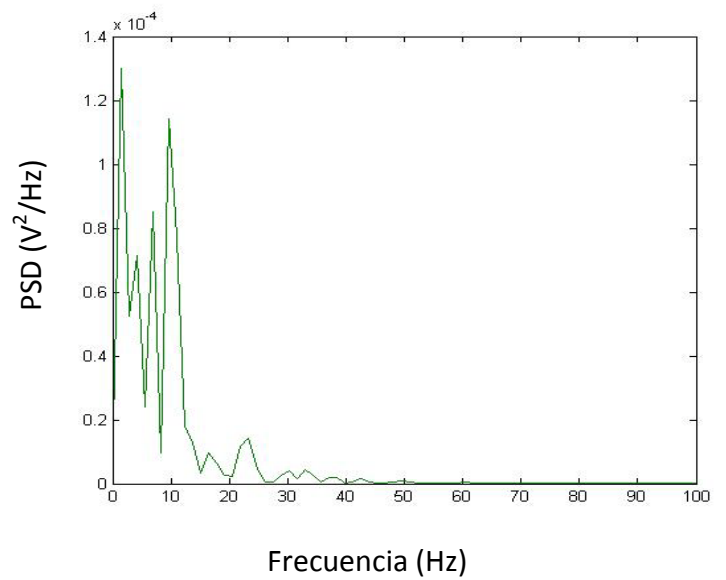


b) Amortiguador convencional

Figura 6.32. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 10 V



a) Amortiguador magneto-reológico



b) Amortiguador convencional

Figura 6.33. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 10 V

- **Valor del *Root Mean Square* (RMS)**

La tabla 6.3 contiene los datos del RMS correspondientes a la lectura del sensor de desplazamiento colocado en la suspensión equipada con amortiguador magneto-reológico, para diferentes valores de tensión de alimentación de dicho amortiguador.

Tabla 6.3. Datos RMS amortiguador magneto-reológico para adoquinado a 30 km/h

RMS (V)	0 V	2.5 V	5 V	7.5 V	10 V
ADOQUINADO 30 km/h	0.0410	0.0345	0.0240	0.0221	0.0148

La tabla 6.4 contiene los datos del RMS correspondientes a la lectura del sensor de desplazamiento colocado en la suspensión equipada con amortiguador convencional, para diferentes valores de tensión de alimentación del amortiguador magneto-reológico.

Tabla 6.4. Datos RMS amortiguador convencional para adoquinado a 30 km/h

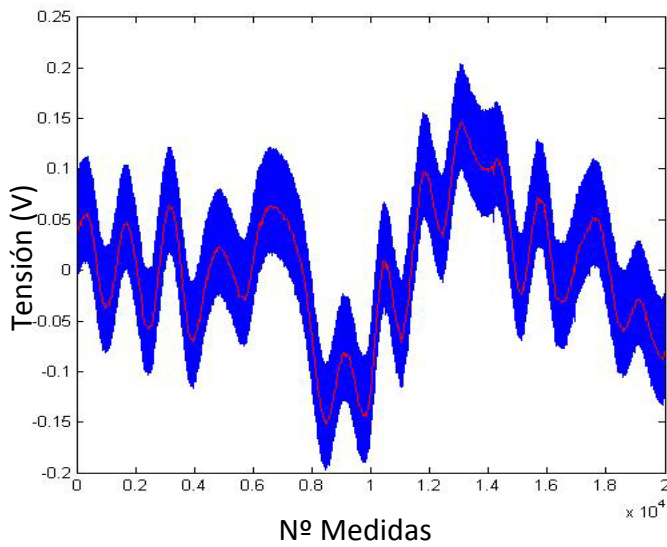
RMS (V)	0 V	2.5 V	5 V	7.5 V	10 V
ADOQUINADO 30 km/h	0.0363	0.0346	0.0333	0.0359	0.0308

6.6.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE ADOQUINADO A 40 km/h

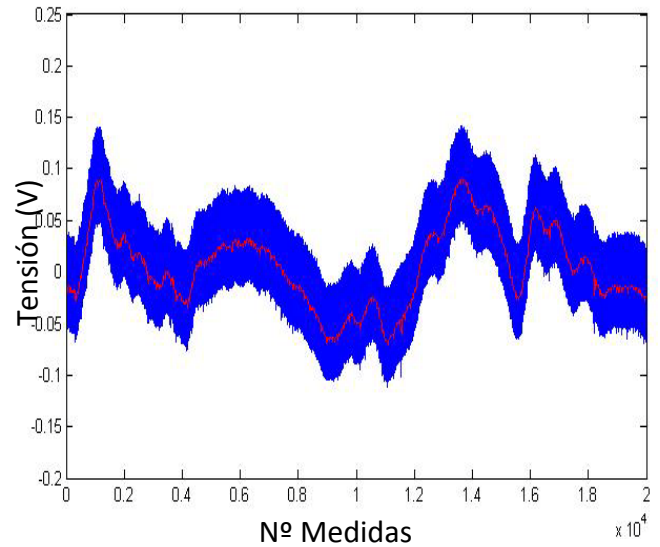
Las figuras 6.34, 6.36, 6.38, 6.40 y 6.42, muestran las lecturas, en voltios, proporcionadas por los sensores de desplazamiento (señal original - color azul, señal filtrada – color rojo) colocados en la suspensión equipada con amortiguador magneto-reológico (a) y con amortiguador convencional (b).

Por otra parte, los resultados que se muestran en las figuras 6.35, 6.37, 6.39, 6.41 y 6.43 corresponden a la respuesta en frecuencia (valores PSD) de las lecturas proporcionadas por los sensores de desplazamiento colocados en la suspensión equipada con amortiguador magneto-reológico (a) y con amortiguador convencional (b).

- Alimentación del amortiguador: 0 V

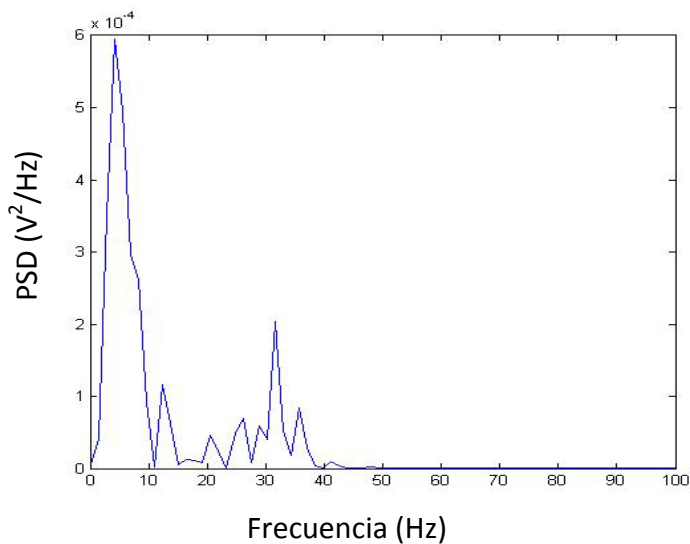


a) Amortiguador magneto-reológico

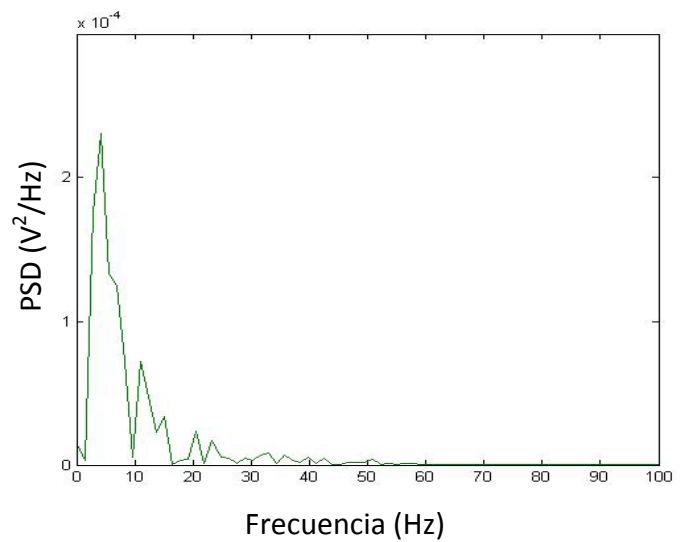


b) Amortiguador convencional

Figura 6.34. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 0 V



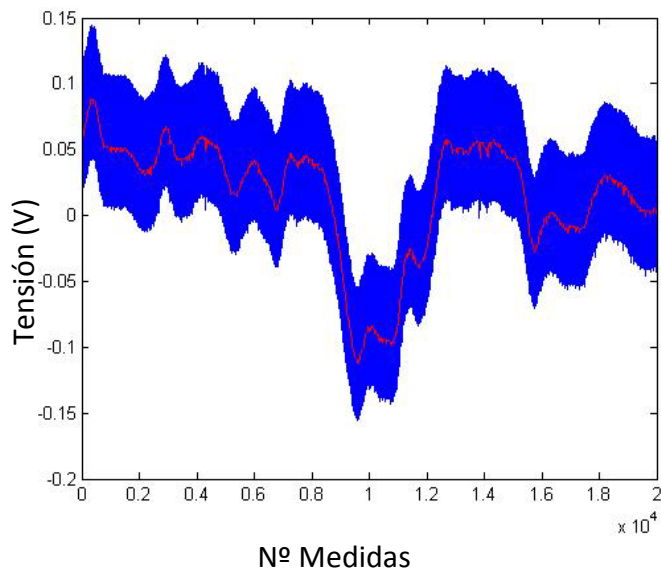
a) Amortiguador magneto-reológico



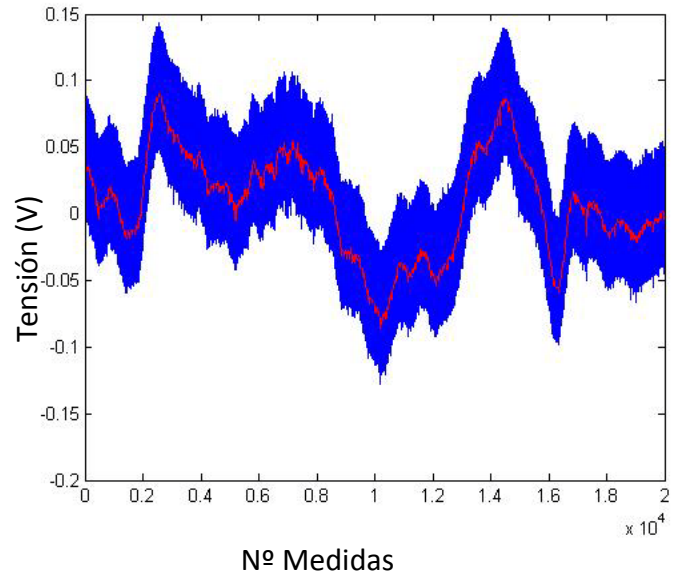
b) Amortiguador convencional

Figura 6.35. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 0 V

- Alimentación del amortiguador: 2,5 V

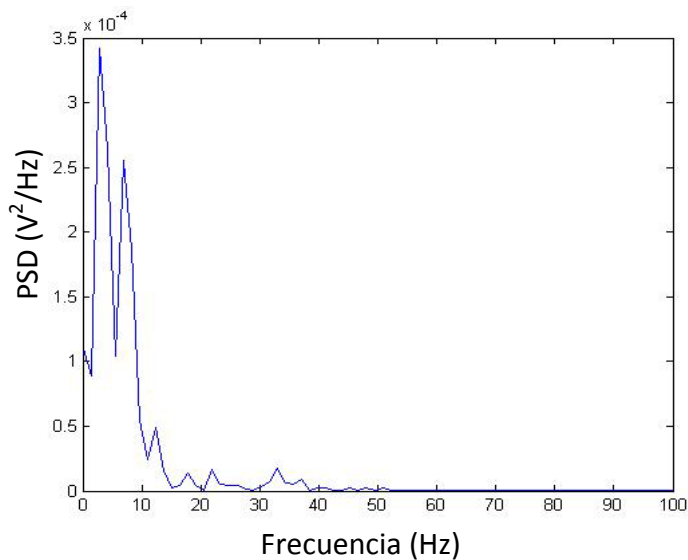


a) Amortiguador magneto-reológico

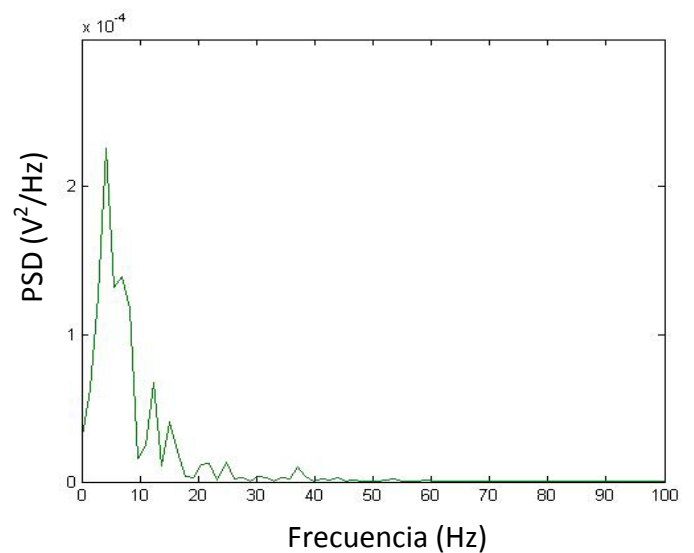


b) Amortiguador convencional

Figura 6.36. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 2.5 V



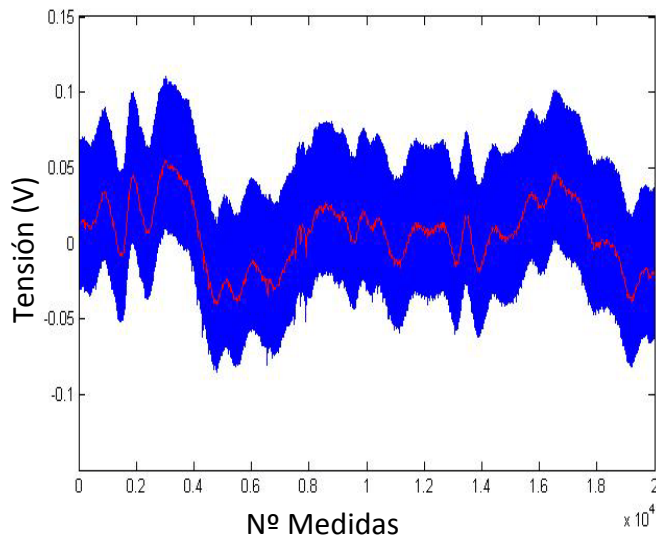
a) Amortiguador magneto-reológico



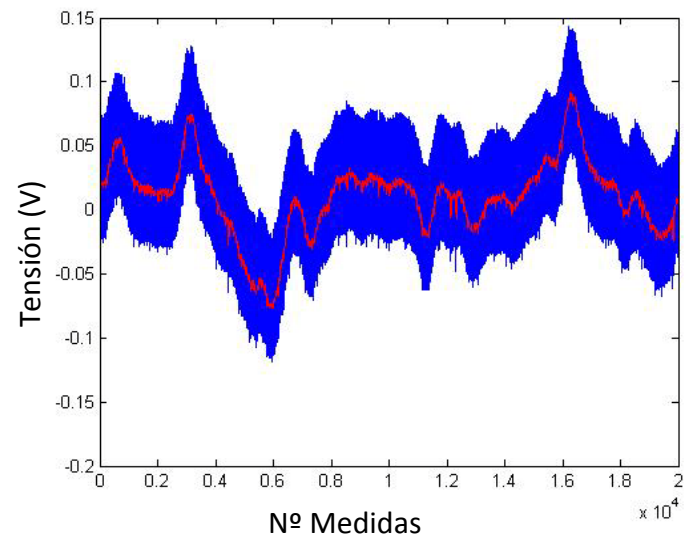
b) Amortiguador convencional

Figura 6.37. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 2.5 V

- Alimentación del amortiguador: 5 V

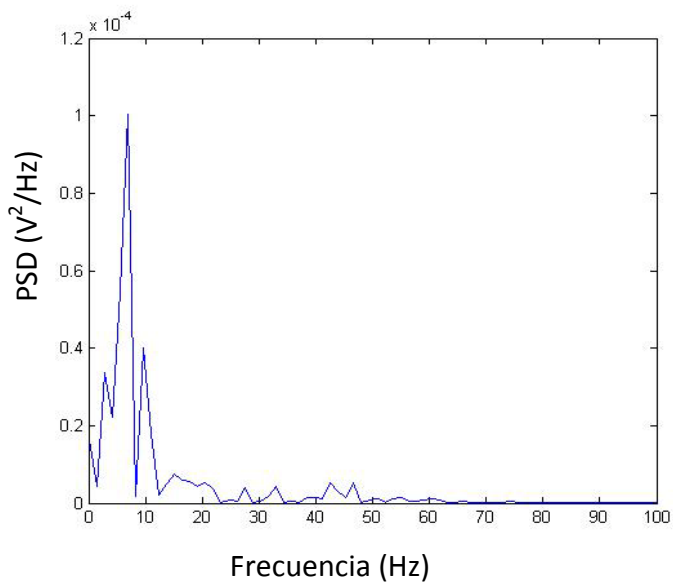


a) Amortiguador magneto-reológico

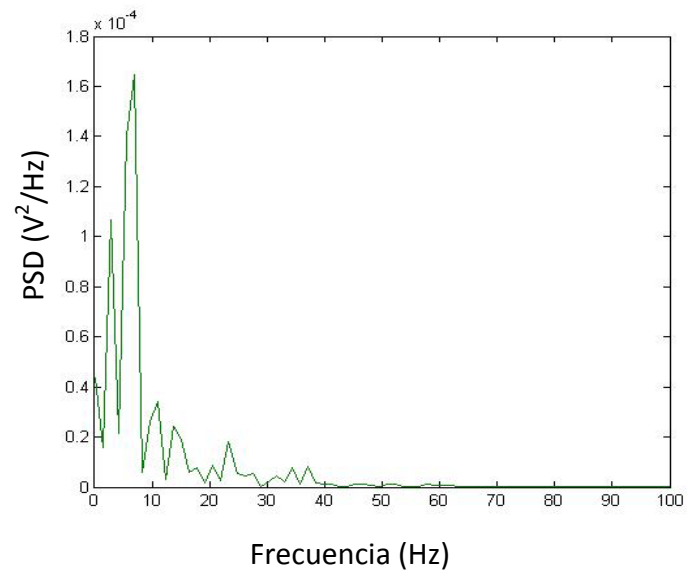


b) Amortiguador convencional

Figura 6.38. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 5 V



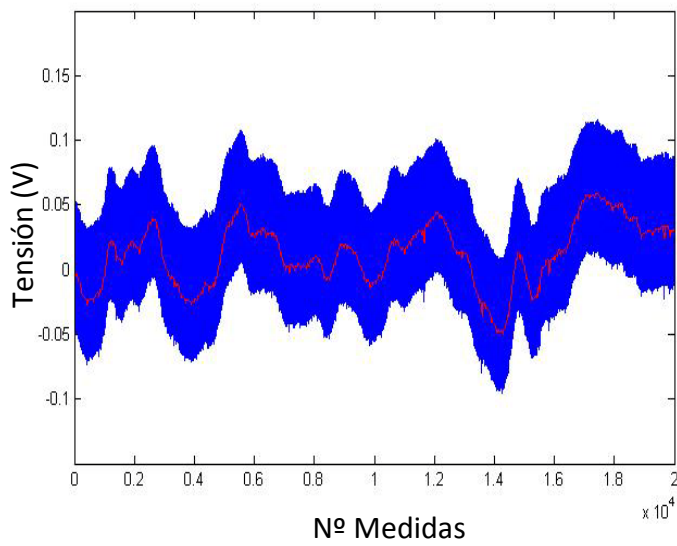
a) Amortiguador magneto-reológico



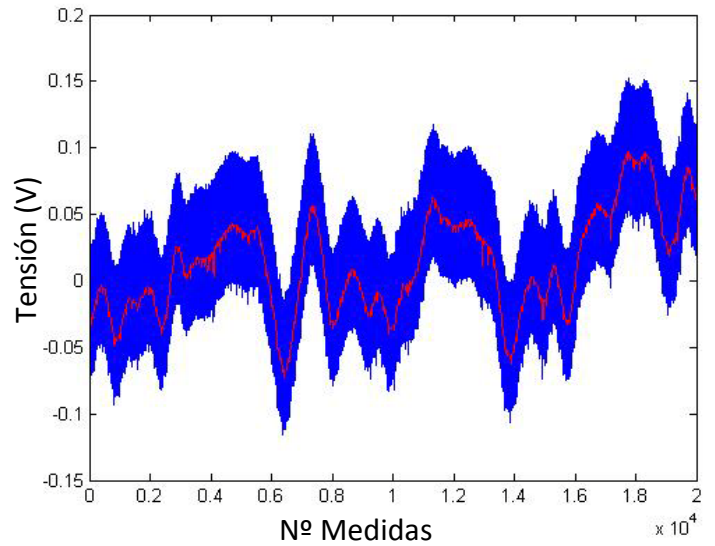
b) Amortiguador convencional

Figura 6.39. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 5 V

- Alimentación del amortiguador: 7,5 V

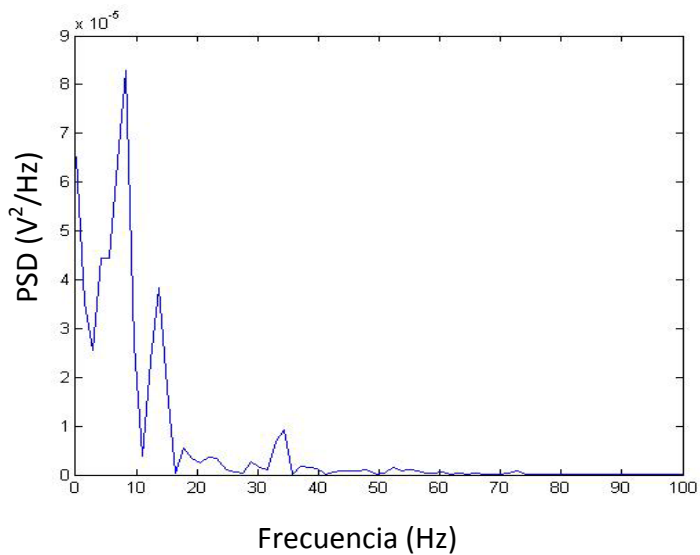


a) Amortiguador magneto-reológico

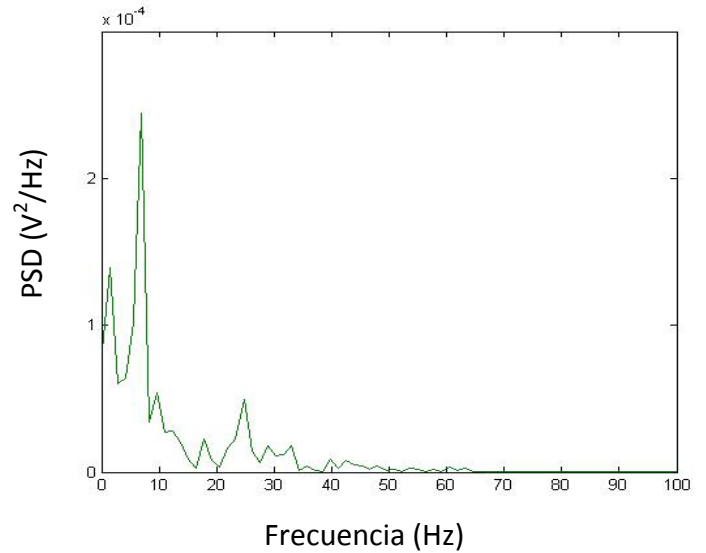


b) Amortiguador convencional

Figura 6.40. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 7.5 V



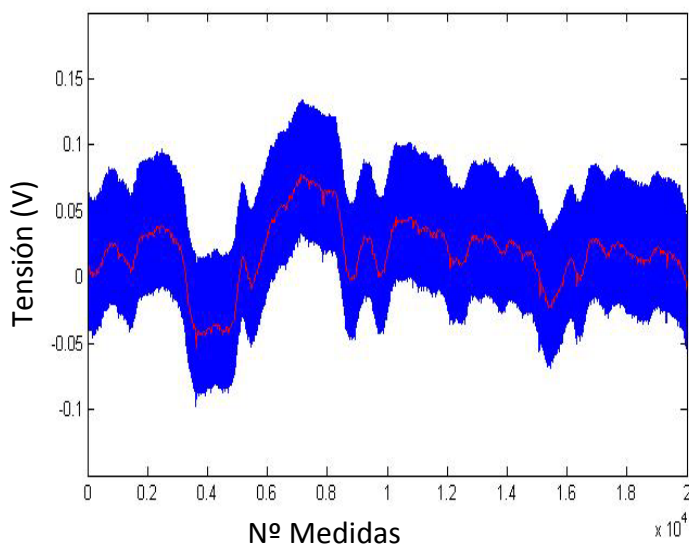
a) Amortiguador magneto-reológico



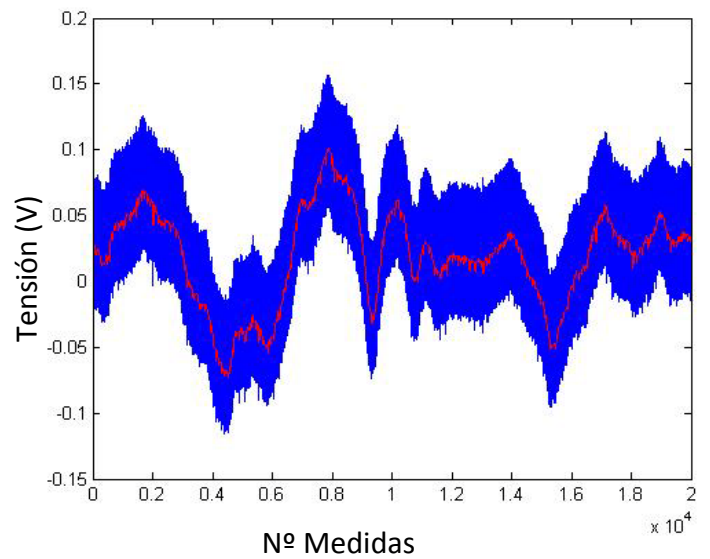
b) Amortiguador convencional

Figura 6.41. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 7.5 V

- Alimentación del amortiguador: 10 V

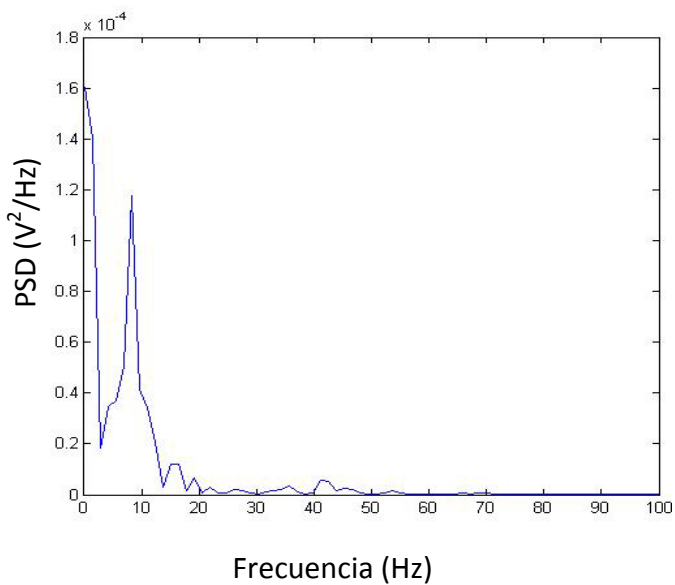


a) Amortiguador magneto-reológico

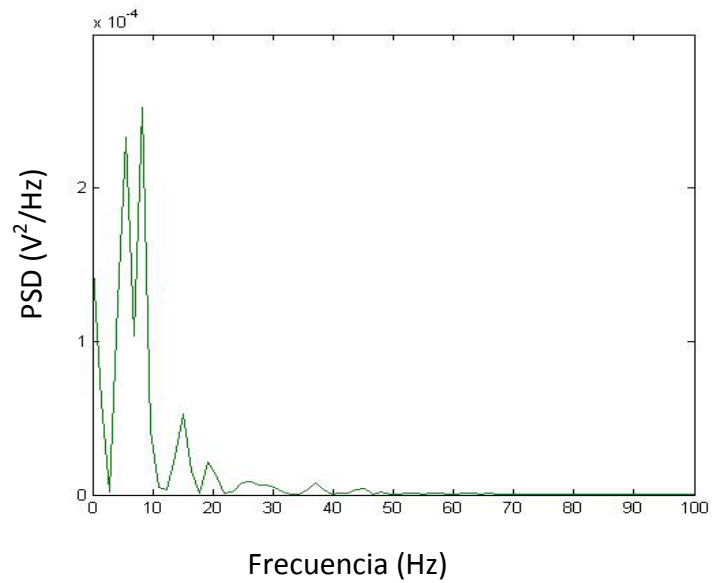


b) Amortiguador convencional

Figura 6.42. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 10 V



a) Amortiguador magneto-reológico



b) Amortiguador convencional

Figura 6.43. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 10 V

- **Valor del *Root Mean Square* (RMS)**

La tabla 6.5 contiene los datos del RMS correspondientes a la lectura del sensor de desplazamiento colocado en la suspensión equipada con amortiguador magneto-reológico, para diferentes valores de tensión de alimentación de dicho amortiguador.

Tabla 6.5. Datos RMS amortiguador magneto-reológico para adoquinado a 40 km/h

RMS (V)	0 V	2.5 V	5 V	7.5 V	10 V
ADOQUINADO 40 km/h	0.0650	0.0472	0.0318	0.0272	0.0227

La tabla 6.6 contiene los datos del RMS correspondientes a la lectura del sensor de desplazamiento colocado en la suspensión equipada con amortiguador convencional, para diferentes valores de tensión de alimentación del amortiguador magneto-reológico.

Tabla 6.6. Datos RMS amortiguador convencional para adoquinado a 40 km/h

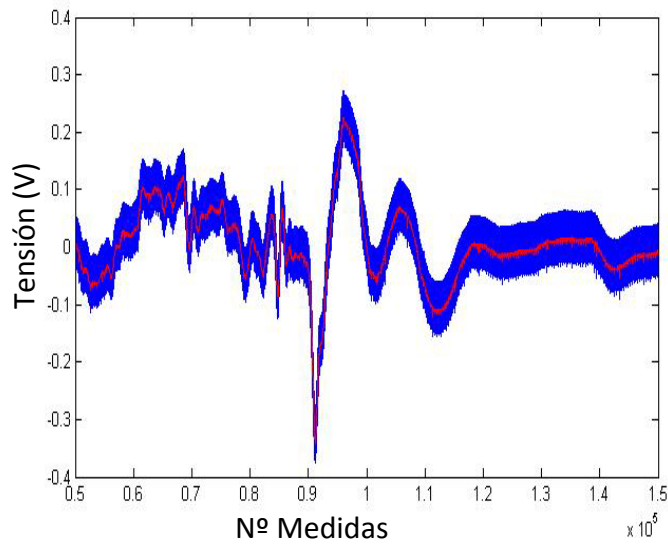
RMS (V)	0 V	2.5 V	5 V	7.5 V	10 V
ADOQUINADO 40 km/h	0.0382	0.0391	0.0313	0.0395	0.0406

6.6.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE ESCALÓN

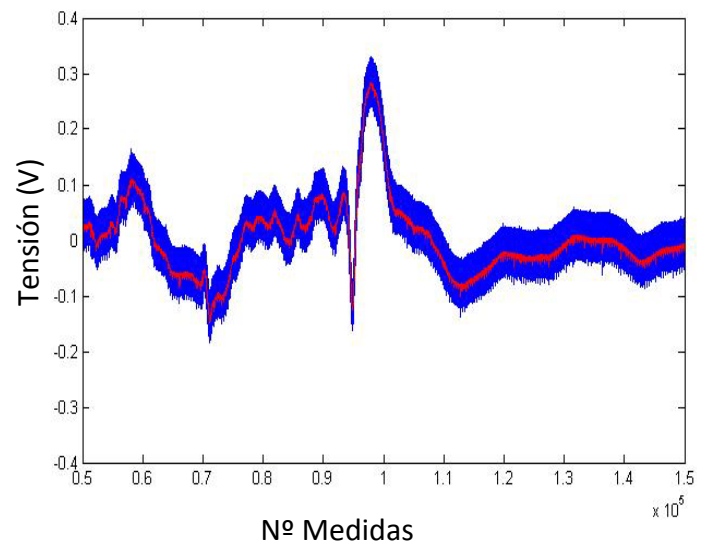
Las figuras 6.44, 6.46, 6.48, 6.50 y 6.52, muestran las lecturas, en voltios, proporcionadas por los sensores de desplazamiento (señal original - color azul, señal filtrada – color rojo) colocados en la suspensión equipada con amortiguador magneto-reológico (a) y con amortiguador convencional (b).

Por otra parte, los resultados que se muestran en las figuras 6.45, 6.47, 6.49, 6.51 y 6.53 corresponden a la respuesta en frecuencia (valores PSD) de las lecturas proporcionadas por los sensores de desplazamiento colocados en la suspensión equipada con amortiguador magneto-reológico (a) y con amortiguador convencional (b).

- Alimentación del amortiguador: 0 V

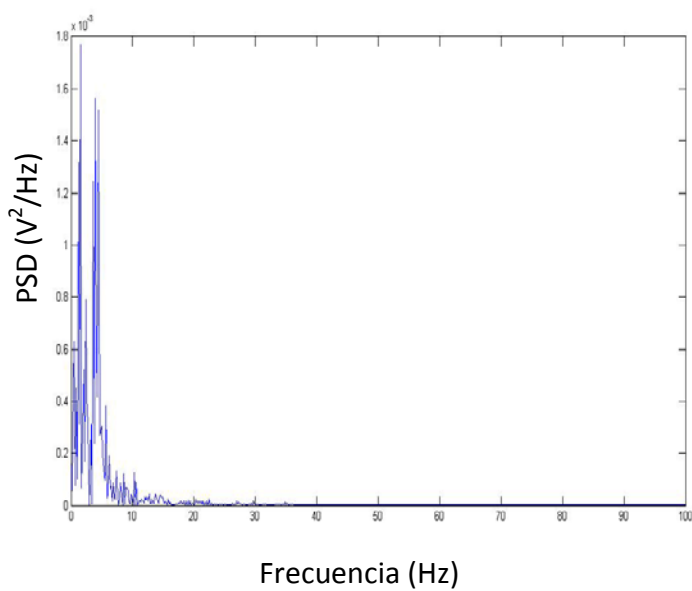


a) Amortiguador magneto-reológico

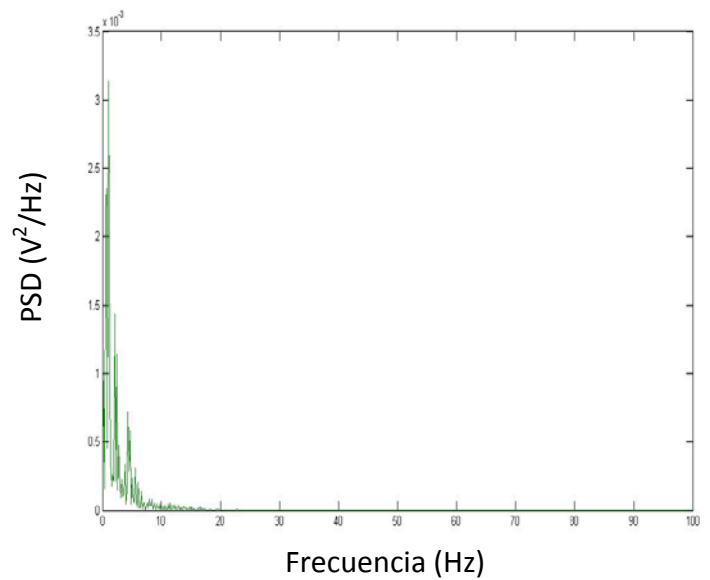


b) Amortiguador convencional

Figura 6.44. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre escalón a 0 V



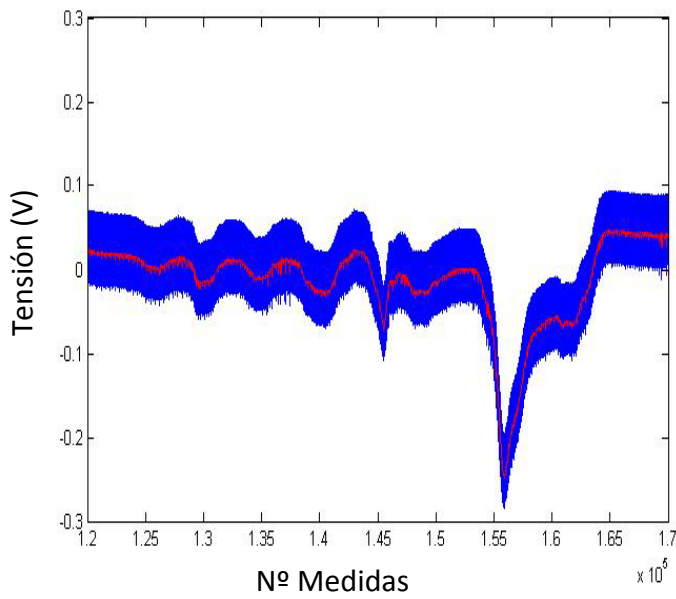
a) Amortiguador magneto-reológico



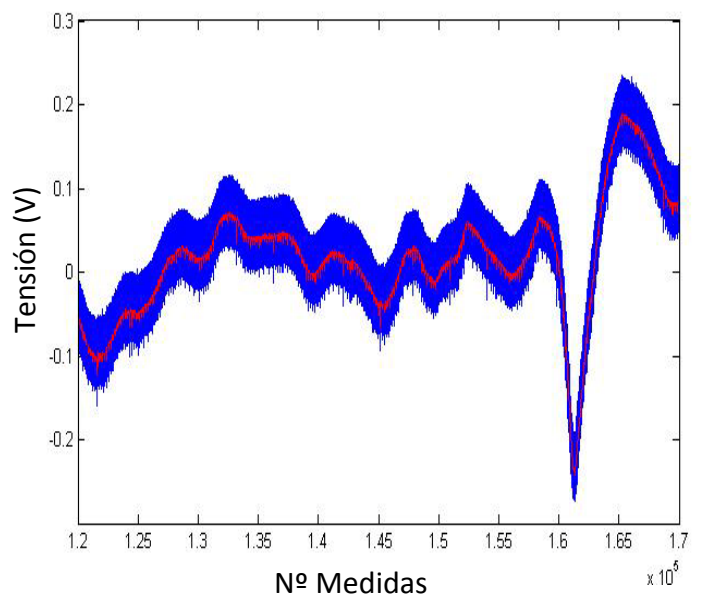
b) Amortiguador convencional

Figura 6.45. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre escalón a 0 V

- Alimentación del amortiguador: 2,5 V

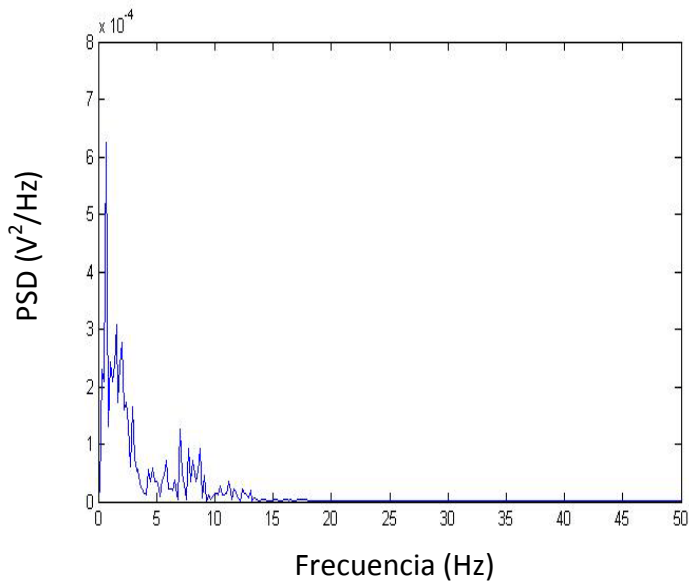


a) Amortiguador magneto-reológico

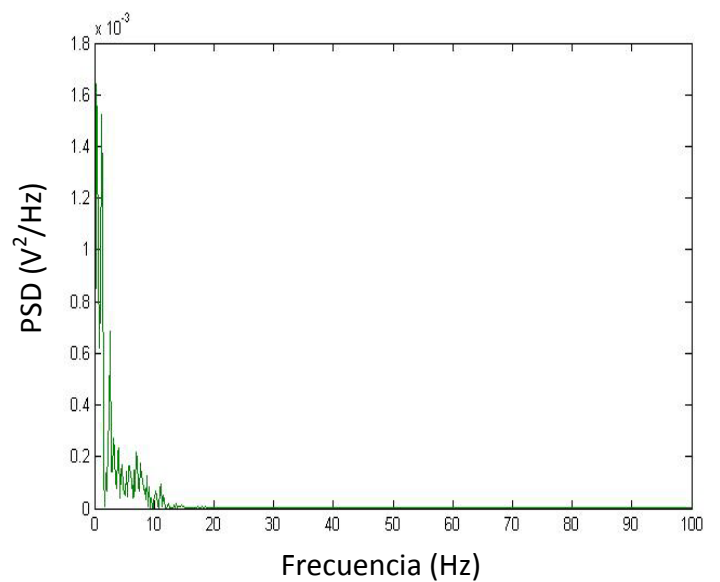


b) Amortiguador convencional

Figura 6.46. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre escalón a 2.5 V



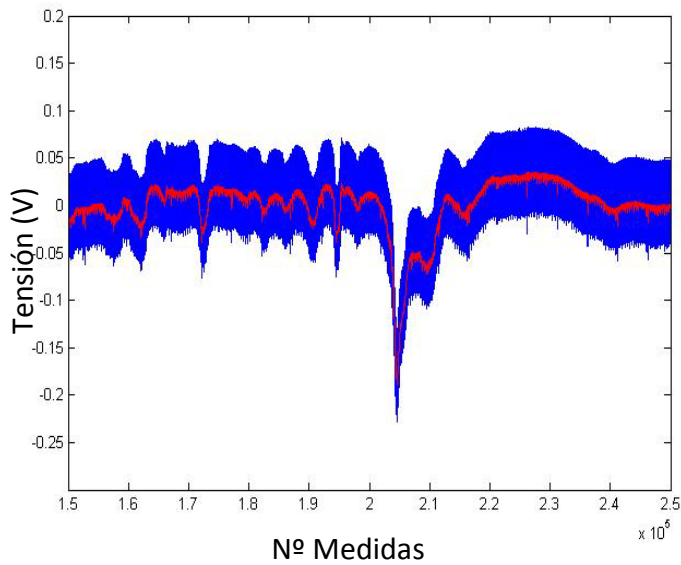
a) Amortiguador magneto-reológico



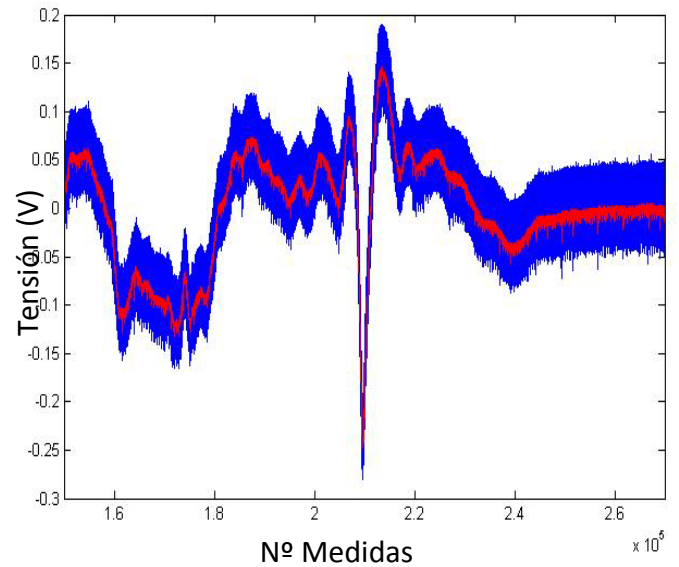
b) Amortiguador convencional

Figura 6.47. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre escalón a 2.5 V

- Alimentación del amortiguador: 5 V

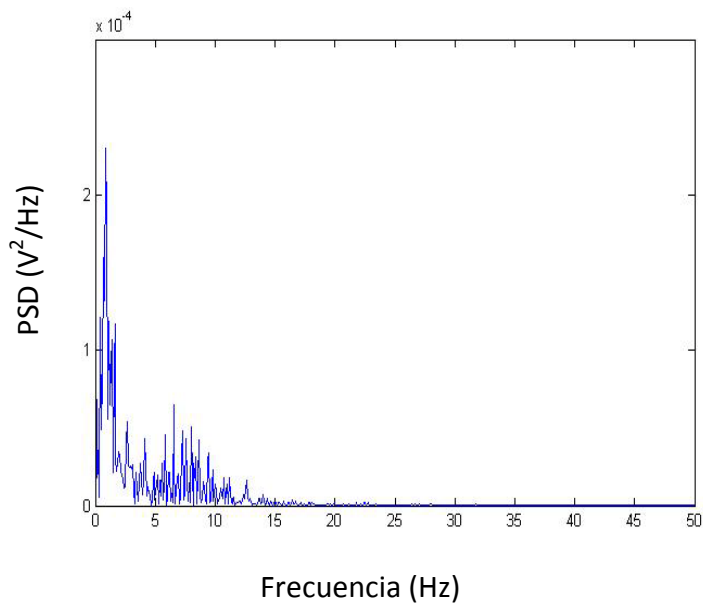


a) Amortiguador magneto-reológico

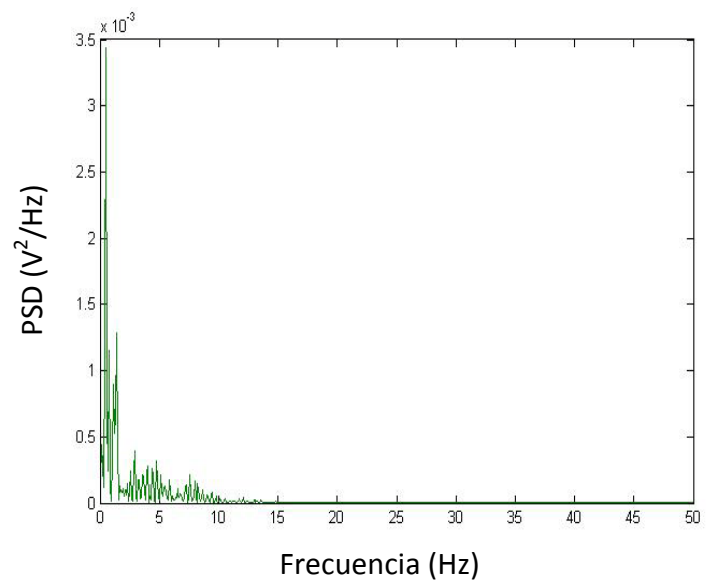


b) Amortiguador convencional

Figura 6.48. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre escalón a 5 V



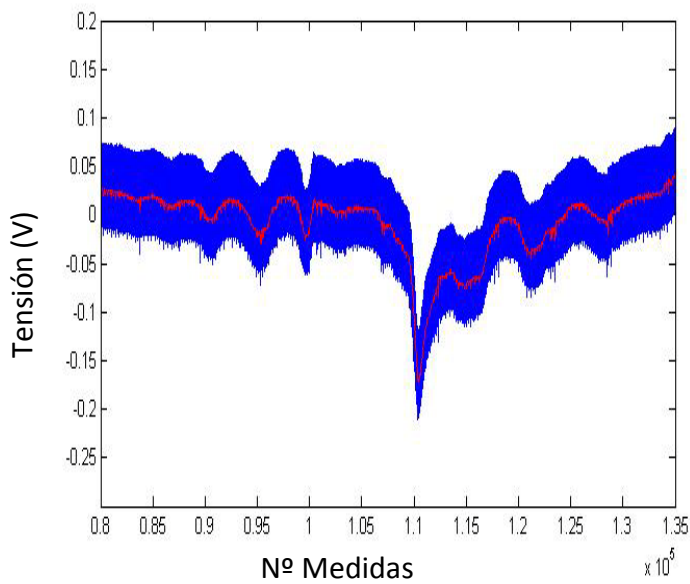
a) Amortiguador magneto-reológico



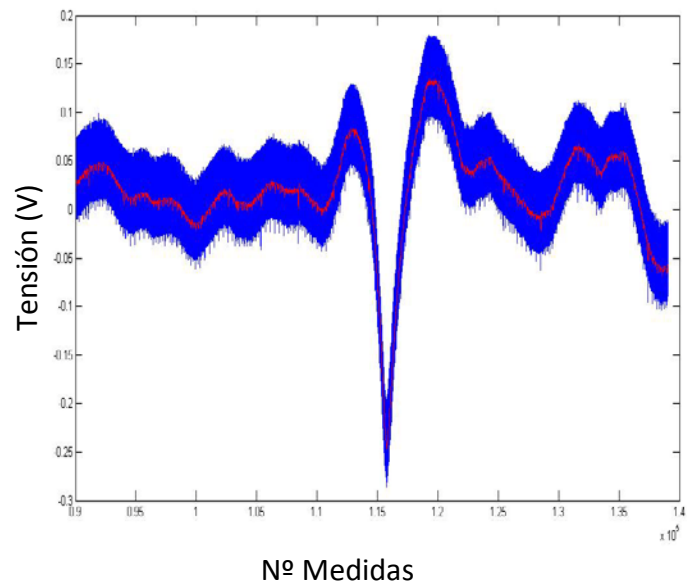
b) Amortiguador convencional

Figura 6.49. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre escalón a 5 V

- Alimentación del amortiguador: 7,5 V

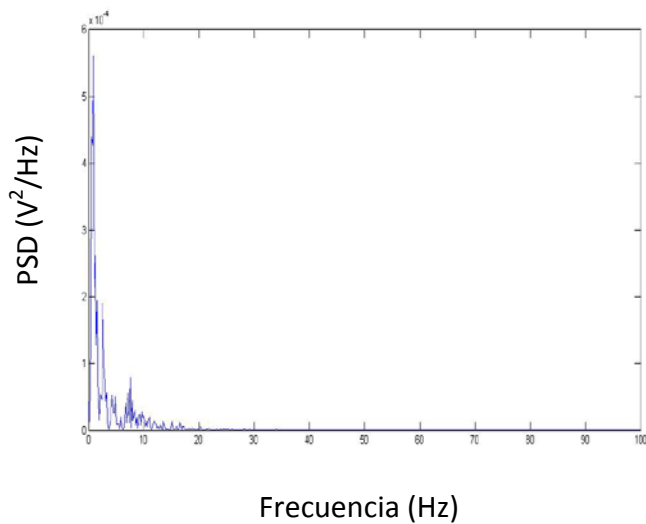


a) Amortiguador magneto-reológico

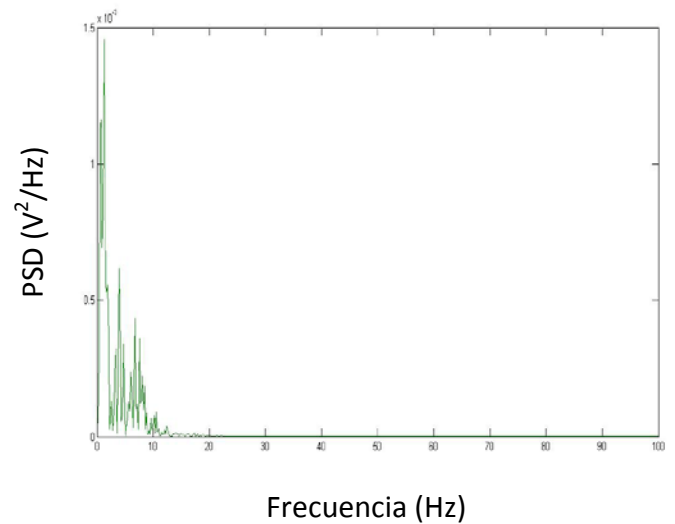


b) Amortiguador convencional

Figura 6.50. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre escalón a 7.5 V



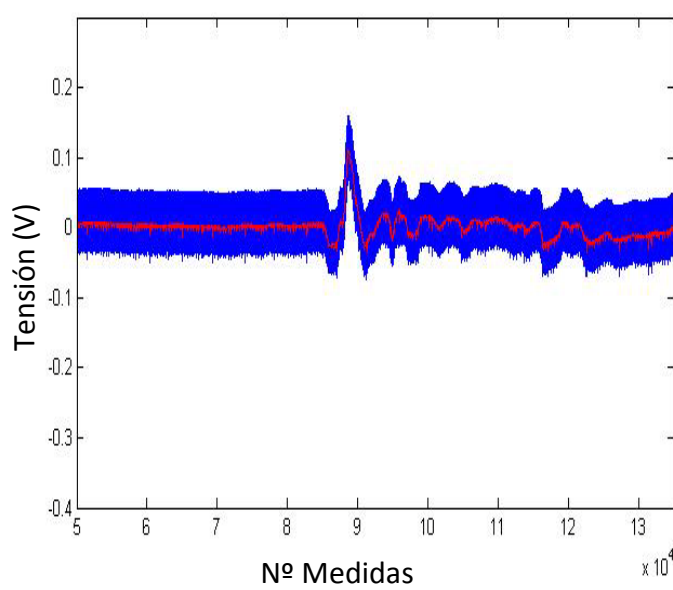
a) Amortiguador magneto-reológico



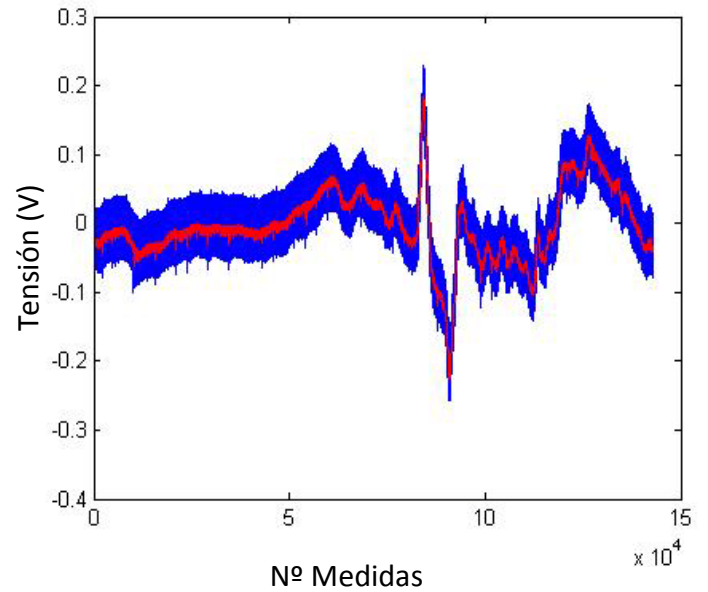
b) Amortiguador convencional

Figura 6.51. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre escalón a 7.5 V

- Alimentación del amortiguador: 10 V

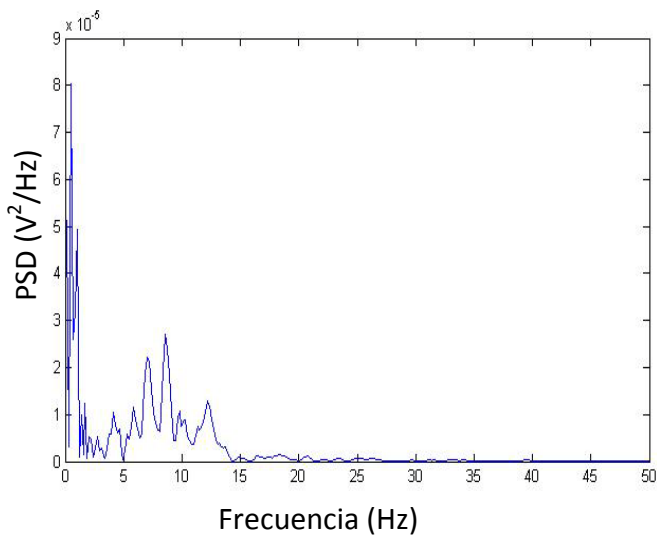


a) Amortiguador magneto-reológico

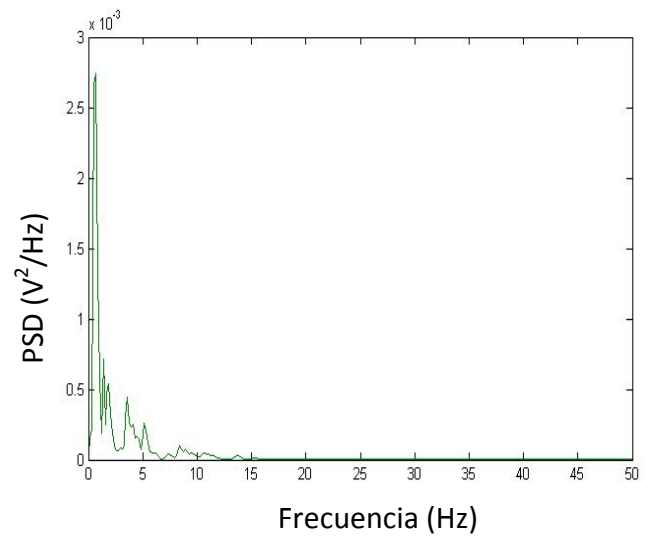


b) Amortiguador convencional

Figura 6.52. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre escalón a 10 V



a) Amortiguador magneto-reológico



b) Amortiguador convencional

Figura 6.53. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre escalón a 10 V

- **Valor del *Root Mean Square* (RMS)**

La tabla 6.7 contiene los datos del RMS correspondientes a la lectura del sensor de desplazamiento colocado en la suspensión equipada con amortiguador magneto-reológico, para diferentes valores de tensión de alimentación de dicho amortiguador.

Tabla 6.7. Datos RMS amortiguador magneto-reológico para escalón

RMS (V)	0 V	2.5 V	5 V	7.5 V	10 V
ESCALÓN	0.0560	0.0311	0.0183	0.0273	0.0126

La tabla 6.8 contiene los datos del RMS correspondientes a la lectura del sensor de desplazamiento colocado en la suspensión equipada con amortiguador convencional, para diferentes valores de tensión de alimentación del amortiguador magneto-reológico.

Tabla 6.8. Datos RMS amortiguador convencional para escalón

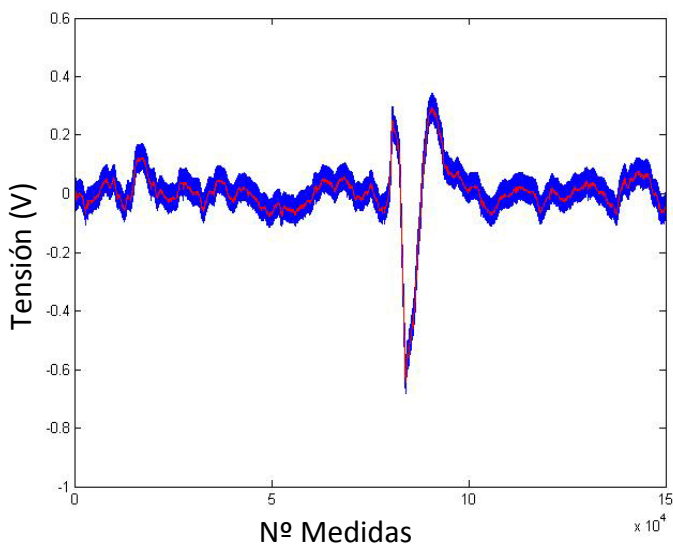
RMS (V)	0 V	2.5 V	5 V	7.5 V	10 V
ESCALÓN	0.0590	0.0516	0.0426	0.0523	0.0513

6.6.5 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE BADÉN

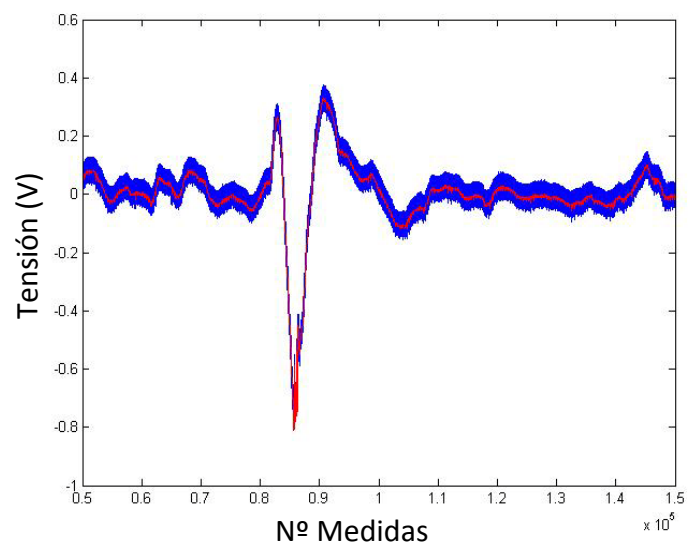
Las figuras 6.54, 6.56, 6.58, 6.60 y 6.62, muestran las lecturas, en voltios, proporcionadas por los sensores de desplazamiento (señal original - color azul, señal filtrada – color rojo) colocados en la suspensión equipada con amortiguador magneto-reológico (a) y con amortiguador convencional (b).

Por otra parte, los resultados que se muestran en las figuras 6.55, 6.57, 6.59, 6.61 y 6.63 corresponden a la respuesta en frecuencia (valores PSD) de las lecturas proporcionadas por los sensores de desplazamiento colocados en la suspensión equipada con amortiguador magneto-reológico (a) y con amortiguador convencional (b).

- Alimentación del amortiguador: 0 V

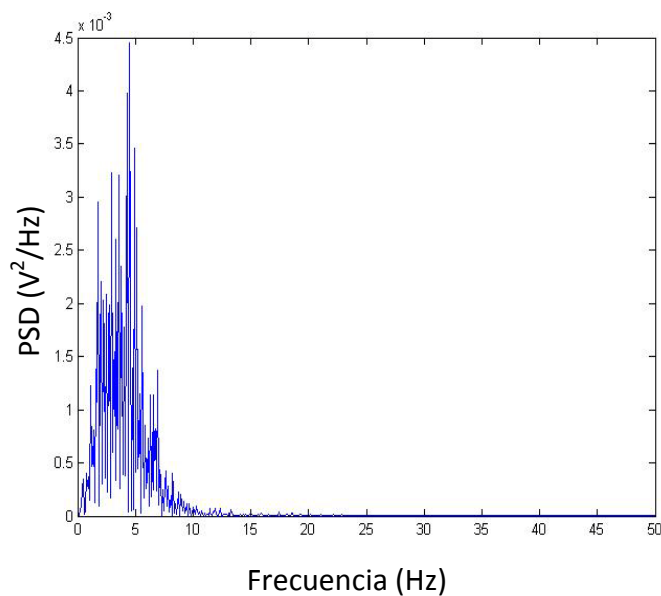


a) Amortiguador magneto-reológico

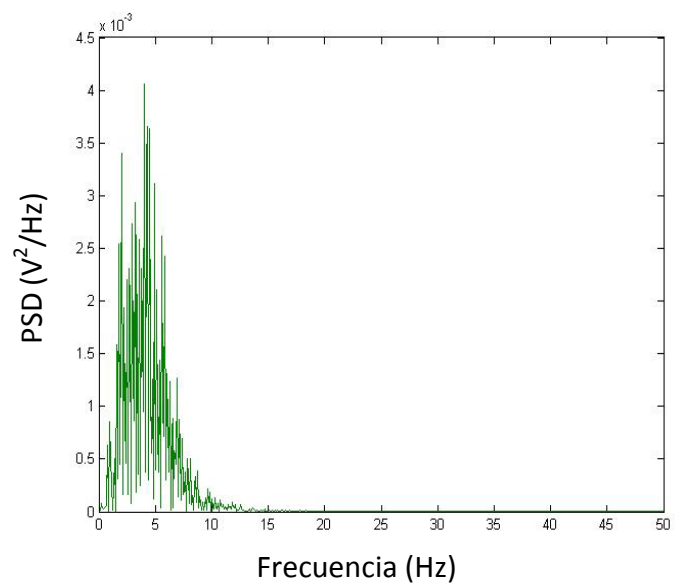


b) Amortiguador convencional

Figura 6.54. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre badén a 0 V



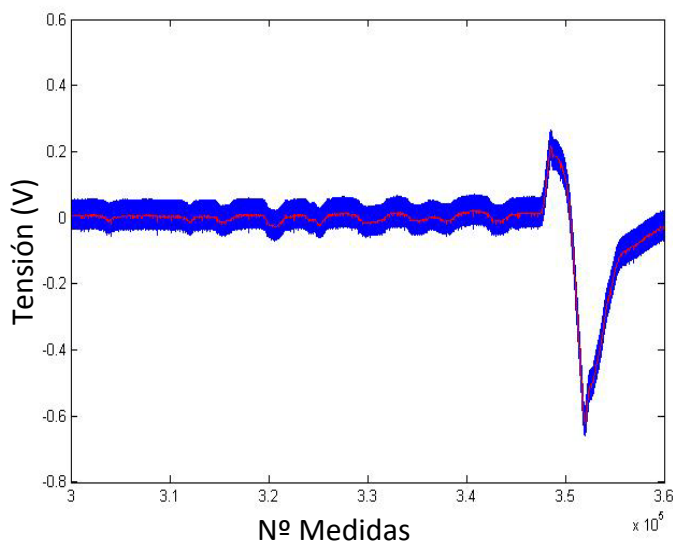
a) Amortiguador magneto-reológico



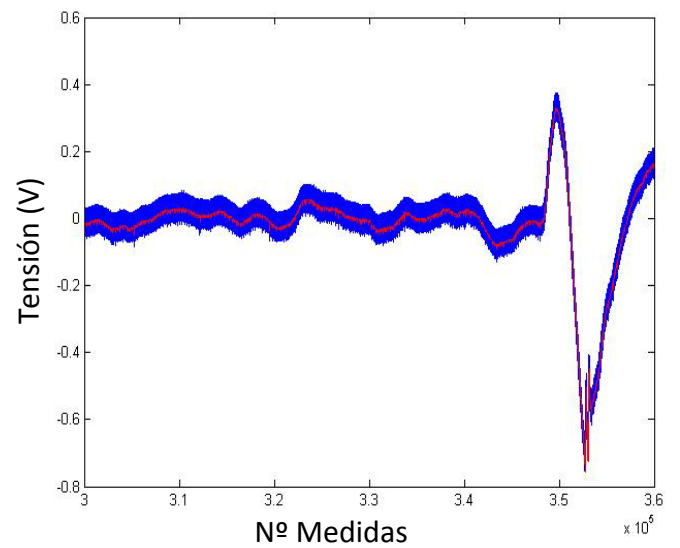
b) Amortiguador convencional

Figura 6.55. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre badén a 0 V

- Alimentación del amortiguador: 2.5 V

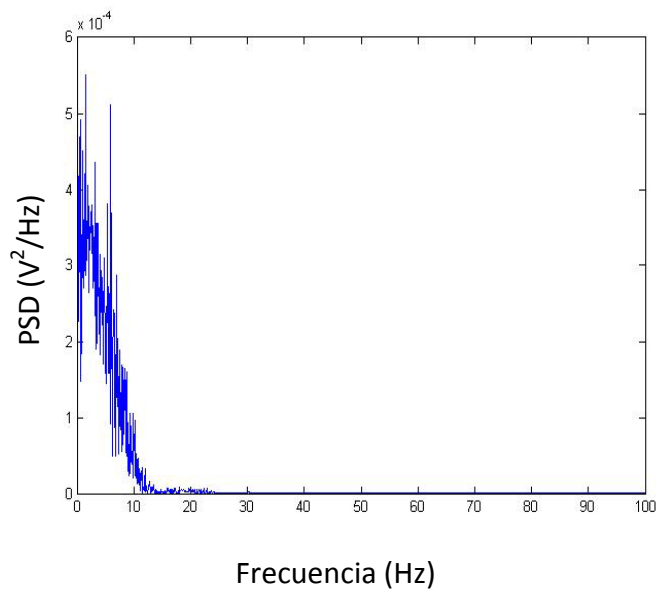


a) Amortiguador magneto-reológico

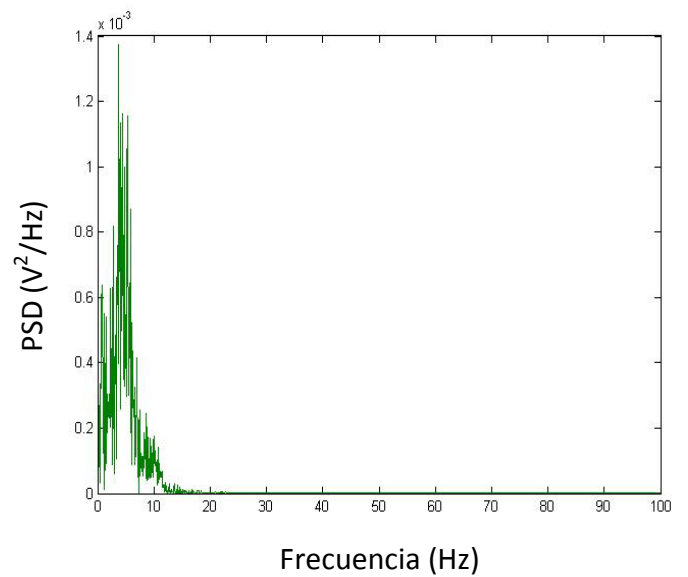


b) Amortiguador convencional

Figura 6.56. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre badén a 2.5 V



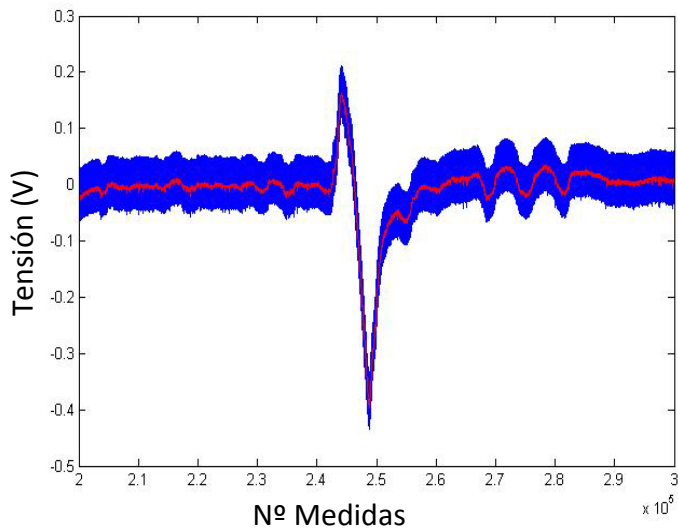
a) Amortiguador magneto-reológico



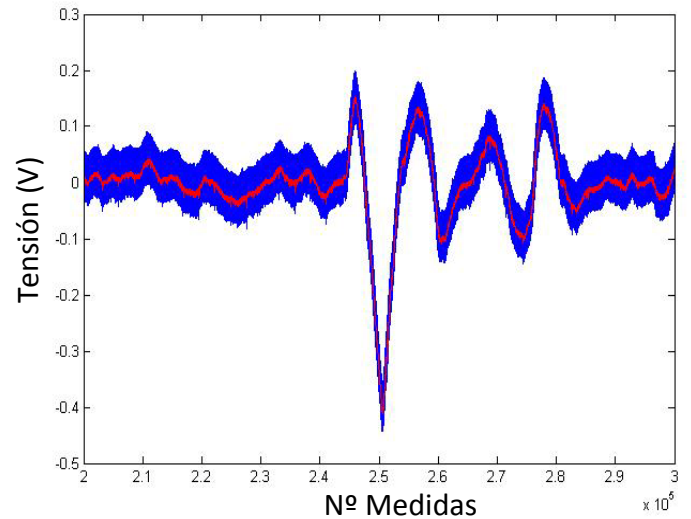
b) Amortiguador convencional

Figura 6.57. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre badén a 2.5 V

- Alimentación del amortiguador: 5 V

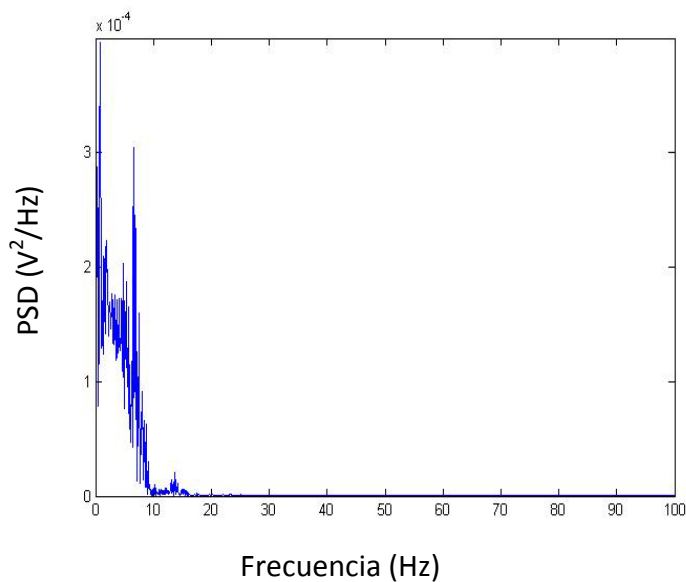


a) Amortiguador magneto-reológico

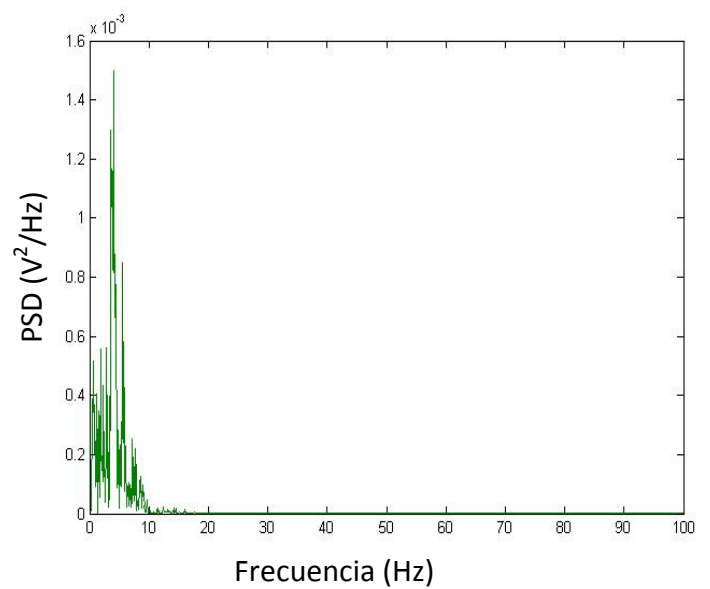


b) Amortiguador convencional

Figura 6.58. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre badén a 5 V



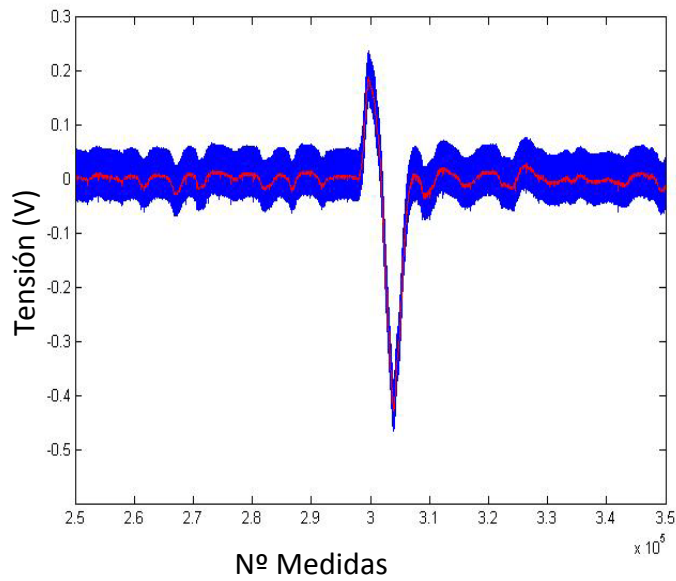
a) Amortiguador magneto-reológico



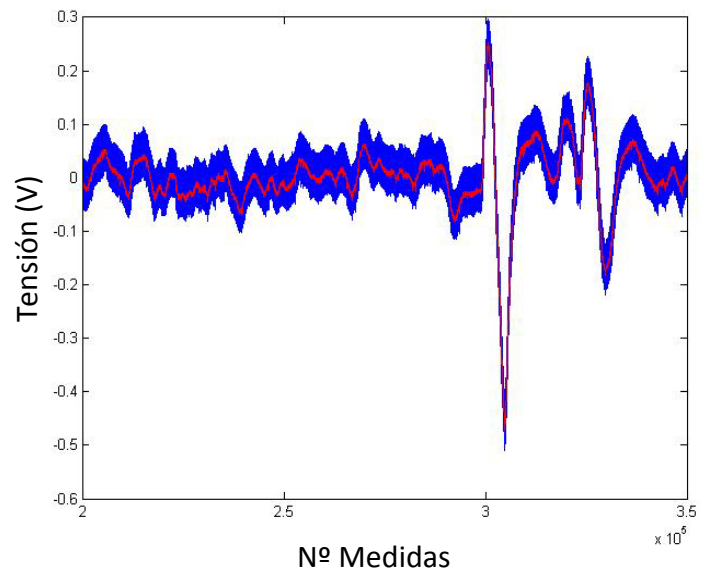
b) Amortiguador convencional

Figura 6.59. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre badén a 5 V

- Alimentación del amortiguador: 7.5 V

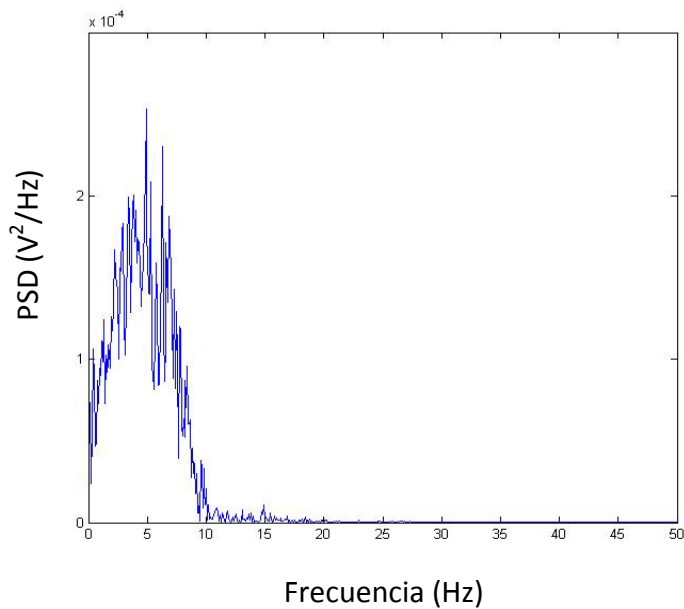


a) Amortiguador magneto-reológico

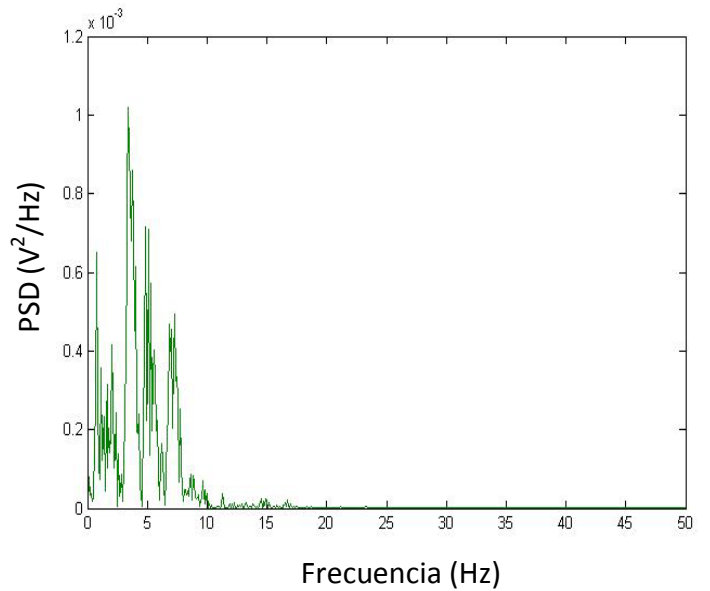


b) Amortiguador convencional

Figura 6.60. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre badén a 7.5 V



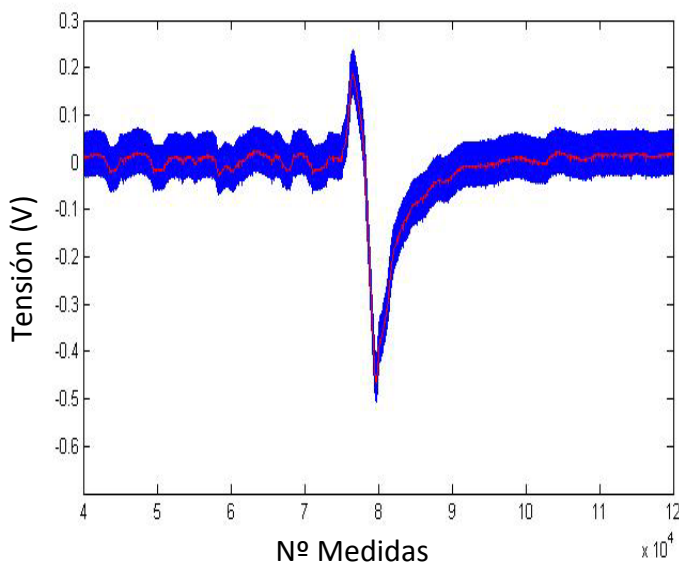
a) Amortiguador magneto-reológico



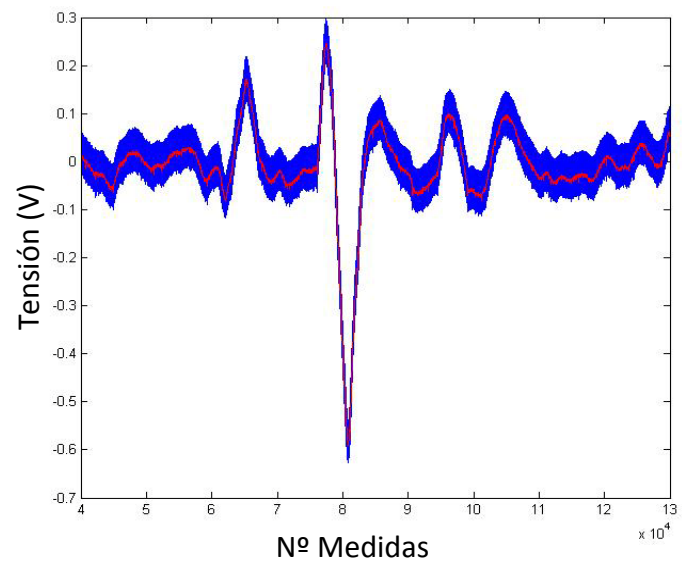
b) Amortiguador convencional

Figura 6.61. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre badén a 7.5 V

- Alimentación del amortiguador: 10 V

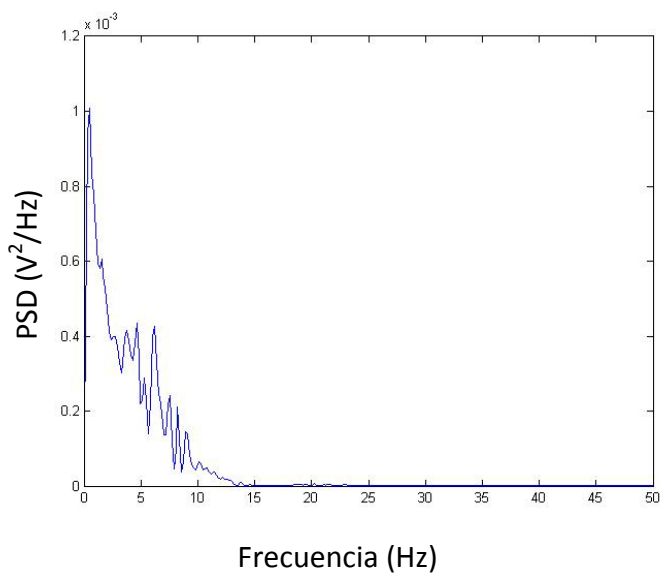


a) Amortiguador magneto-reológico

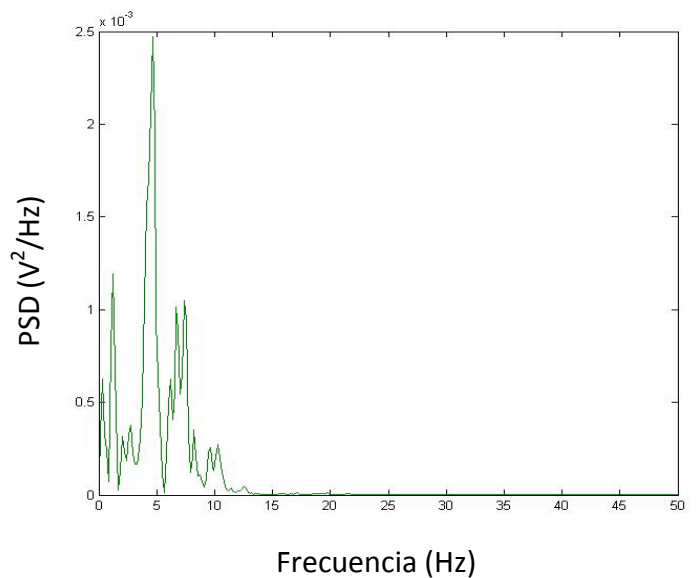


b) Amortiguador convencional

Figura 6.62. Tensión frente al número de medidas de ensayo sobre badén a 0 V



a) Amortiguador magneto-reológico



b) Amortiguador convencional

Figura 6.63. PSD frente a la frecuencia de ensayo sobre badén a 10 V

- **Valor del *Root Mean Square* (RMS)**

La tabla 6.9 contiene los datos del RMS correspondientes a la lectura del sensor de desplazamiento colocado en la suspensión equipada con amortiguador magneto-reológico, para diferentes valores de tensión de alimentación de dicho amortiguador.

Tabla 6.9. Datos RMS amortiguador magneto-reológico para badén

RMS	0 V	2.5 V	5 V	7.5 V	10 V
BADÉN	0.0889	0.0486	0.0354	0.0338	0.0586

La tabla 6.10 contiene los datos del RMS correspondientes a la lectura del sensor de desplazamiento colocado en la suspensión equipada con amortiguador convencional, para diferentes valores de tensión de alimentación del amortiguador magneto-reológico.

Tabla 6.10. Datos RMS amortiguador convencional para badén

RMS	0 V	2.5 V	5 V	7.5 V	10 V
BADÉN	0.0922	0.0602	0.0485	0.0476	0.0740

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

7.1 CONCLUSIONES

Este proyecto ha consistido en el montaje de un amortiguador magneto-reológico RD 1005.3 en la suspensión delantera de un vehículo automóvil. Se han instalado dos sensores de desplazamiento a ambos lados de la suspensión para poder analizar el comportamiento del amortiguador convencional y del magneto-reológico. Debido a que el amortiguador magneto-reológico utilizado para los estudios de este proyecto fue fabricado para la suspensión de asientos de vehículos de gran tonelaje, ha sido necesario realizar las modificaciones pertinentes para poder adaptarlo a una suspensión vehicular.

Existe la posibilidad de que algunas medidas no sean correctas, ya que la carrera del vástago del amortiguador magneto-reológico es muy reducida, y en los ensayos más exigentes dicho amortiguador podría haber hecho tope y falsear las medidas obtenidas.

Los ensayos de este proyecto consisten en pruebas realizadas sobre un terreno adoquinado, un escalón y un badén. Cada ensayo se ha realizado a diferentes niveles

de tensión del amortiguador, concretamente a 0, 2.5, 5, 7.5 y 10 V. Debido a esta variación de voltaje, ha sido posible conocer el comportamiento del amortiguador magneto-reológico. Las velocidades escogidas en los ensayos sobre terreno adoquinado han sido de 20, 30 y 40 km/h, y, en cuanto a los ensayos realizados sobre escalón y badén, la velocidad escogida ha sido únicamente de 20 km/h, ya que esta es la velocidad que adoptaría el vehículo para superar dichos obstáculos en una situación real.

Observando los datos del RMS correspondientes al amortiguador magneto-reológico facilitados en el apartado 6.6, se deduce que, a medida que se aumenta la tensión de este, es decir, a medida que se aumenta su dureza, los valores del RMS correspondientes al amortiguador magneto-reológico disminuyen, o lo que es lo mismo, el desplazamiento experimentado por este disminuye. Por otra parte, a medida que se aumenta la velocidad del vehículo automóvil en un mismo terreno, los valores del RMS correspondientes al amortiguador magneto-reológico obtenidos también aumentan, es decir, que dicho amortiguador experimenta un mayor desplazamiento.

Respecto a los datos del RMS correspondientes al amortiguador convencional facilitados en el apartado 6.6, se observa que son independientes de la variación de la tensión del amortiguador magneto-reológico, ya que mantiene un comportamiento constante en cada ensayo realizado. Gracias a esta conclusión se puede afirmar que la toma de datos es correcta, pues se adquieren unos valores totalmente lógicos, ya que la variación de tensión del amortiguador magneto-reológico no tiene que afectar en absoluto al comportamiento del amortiguador convencional.

Entre los datos obtenidos del RMS, se encuentran algunos datos atípicos, como por ejemplo los datos obtenidos en los ensayos realizados a 20 km/h, con un voltaje de 7,5 y 10 V para el amortiguador magneto-reológico (ver tabla 6.1), que son 0,0113 y 0,0114 respectivamente. El error existente entre ambas medidas es de un 0,87%, lo que nos lleva a considerarlos como idénticos. Este error puede ser debido a un exceso de velocidad a la hora de la toma de datos a 10 V. Otro dato atípico es el reflejado en

el ensayo sobre escalón con una tensión de 5 V, ya que el dato del RMS es inferior a todos los demás de dicho ensayo (ver tablas 6.7 y 6.8). La posible razón de dicho error es que se haya disminuido la velocidad del vehículo automóvil en el momento del ensayo. Por otro lado, otros datos atípicos son los adquiridos a 0 y a 10 V en el ensayo sobre badén para ambos amortiguadores, ya que resultan excesivamente altos en comparación con los de 2.5, 5 y 7.5 V del mismo ensayo (ver tablas 6.9 y 6.10). Los errores que afectan a estas medidas son de un 42,3% para el caso del amortiguador magneto-reológico y un 35,7% para el caso del convencional. La posible razón es que se haya aumentado la velocidad en el momento del ensayo, ya que afecta a los dos amortiguadores por igual. El error producido por la variación de la velocidad es provocado por un error humano, ya que el vehículo de pruebas no dispone de control automático de velocidad.

7.2 FUTUROS DESARROLLOS

Debido al fuerte desarrollo que están experimentando los fluidos reológicos, hace que el estudio e investigación de las diversas propiedades y aplicaciones de dichos fluidos adquieran una gran importancia dentro del mundo de la industria y de la automoción.

En este proyecto se ha realizado el estudio del comportamiento un amortiguador magneto-reológico en la suspensión delantera de un vehículo automóvil turismo. Los futuros desarrollos que ofrece este Proyecto de Fin de Carrera son los siguientes:

- La realización de un estudio más avanzado del presente proyecto, analizando el comportamiento del amortiguador magneto-reológico en autovías y autopistas, realizando ensayos a velocidades en torno a los 120 km/h.
- El estudio del correcto montaje del amortiguador magneto-reológico, así como del posterior análisis de este.
- Continuar la línea de desarrollo seguida en este proyecto, optimizando los parámetros de carrera del amortiguador, e incluso estudiar la posibilidad de acoplar un amortiguador magneto-reológico específico para esta aplicación.
- Realizar un estudio sobre la posible adaptación de una suspensión magneto-reológica a la suspensión trasera de un vehículo convencional.
- Desarrollo de la instalación eléctrica necesaria en el automóvil para el funcionamiento de los cuatro amortiguadores magneto-reológicos.
- Realizar el estudio dinámico del vehículo automóvil mediante la incorporación de acelerómetros.

ANEXO A

ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS

A.1 INTRODUCCIÓN

A continuación se adjuntan las características técnicas de los equipos empleados para la realización del presente proyecto. En este apartado se detallarán tanto el amortiguador magneto-reológico, objeto de estudio, como los equipos PXI de National Instruments utilizados para el gobierno de los ensayos de toma de datos.

A.2 CARACTERÍSTICAS DEL AMORTIGUADOR RD-1000.3 DE LORD

El RD-1000 es un amortiguador compacto con fluido Magneto-reológico, fabricado por la empresa alemana "Lord". Es una combinación de manejabilidad, respuesta y densidad energética. En el interior de monotubo se le aplica al fluido un campo magnético que hace que varíe sus características. Las características de amortiguamiento del fluido incrementan con prácticamente infinita precisión y con un tiempo de respuesta de 25 ms. Diseño de control liso, simple diseño y silencioso funcionamiento, este amortiguador MR es especialmente apropiado para aplicaciones de suspensiones [21]. En la tabla A.1 se incluyen las características más importantes del amortiguador magneto-reológico RD-1005.3 fabricado por la empresa Lord.

Tabla A.1.Características del amortiguador RD-1005.3 de Lord

Longitud en compresión	6,1 pulgadas (155mm)
Longitud en extensión	8,2 pulgadas (255mm)
Diámetro del amortiguador	1,63 pulgadas (41,4mm)
Diámetro vástago Shaft	0,39 pulgadas (10mm)
Peso	1,8 libras (800g)
Para la instalación del Pin	0,47 pulgadas (12mm)
Características eléctricas	
Amperios de salida	Máximo 2 amperios
Voltaje de salida	12 V DC
Resistencia Temperatura ambiente	5 ohm
Resistencia (a 160°F 71° C)	7 ohm
Fuerza del amortiguador (<i>peak to peak</i>)	
2 pulgadas/segundos 1 amperio	>500 libras (2224 N)
8 pulgadas/segundo 0 amperio	<150 libras (667 N)
Características mecánicas	
Mínima Fuerza de tensión	1000 libras (4448 N)
Máximo rango de operación	160°F (71° C)
Temperaturas límite de Almacenamiento	212°F a -40°F (100 °C a 40° C)
Durabilidad	2 millones de ciclos @ +/- 0,5 pulgadas (+/-13mm), 2 hercios con salida de corriente variable entre 0 y 0,8 amperios.
Tiempo de respuesta	< 25 ms – tiempo para alcanzar el 90% del máximo niveles desde 0 a 1 amperio con pasos de @ 2 pulgadas/segundo (51 mm/s)
Conector amortiguador (2 pin)	Cuerpo: Modelo 03-06-2023 Pins: Modelo 02-06-2103
Conector de unión (2pin)	Cuerpo: Modelo 03-06-1023 Pins: Modelo 02-06-1103

En la figura A.1 se muestra una gráfica que contiene Fuerza (N) frente a Velocidad (m/s) del amortiguador magneto-reológico RD 1005.3 de Lord.

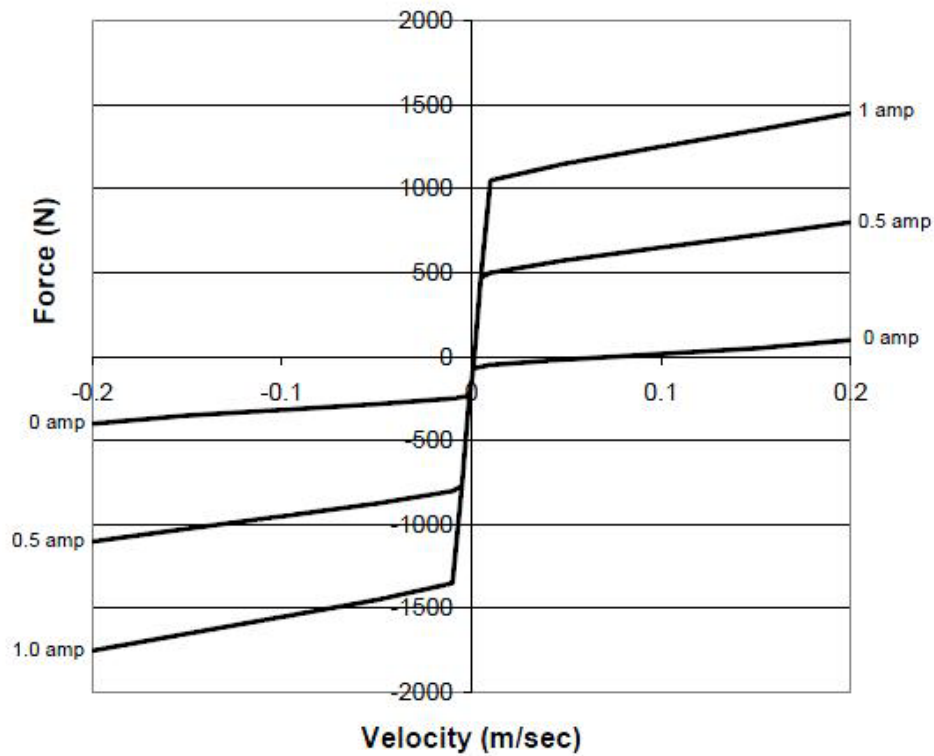


Figura A.1 Gráfica Fuerza vs velocidad del amortiguador RD-1005.3

La figura A.2 muestra las diferentes vistas y medidas del amortiguador magneto-reológico estudiado.

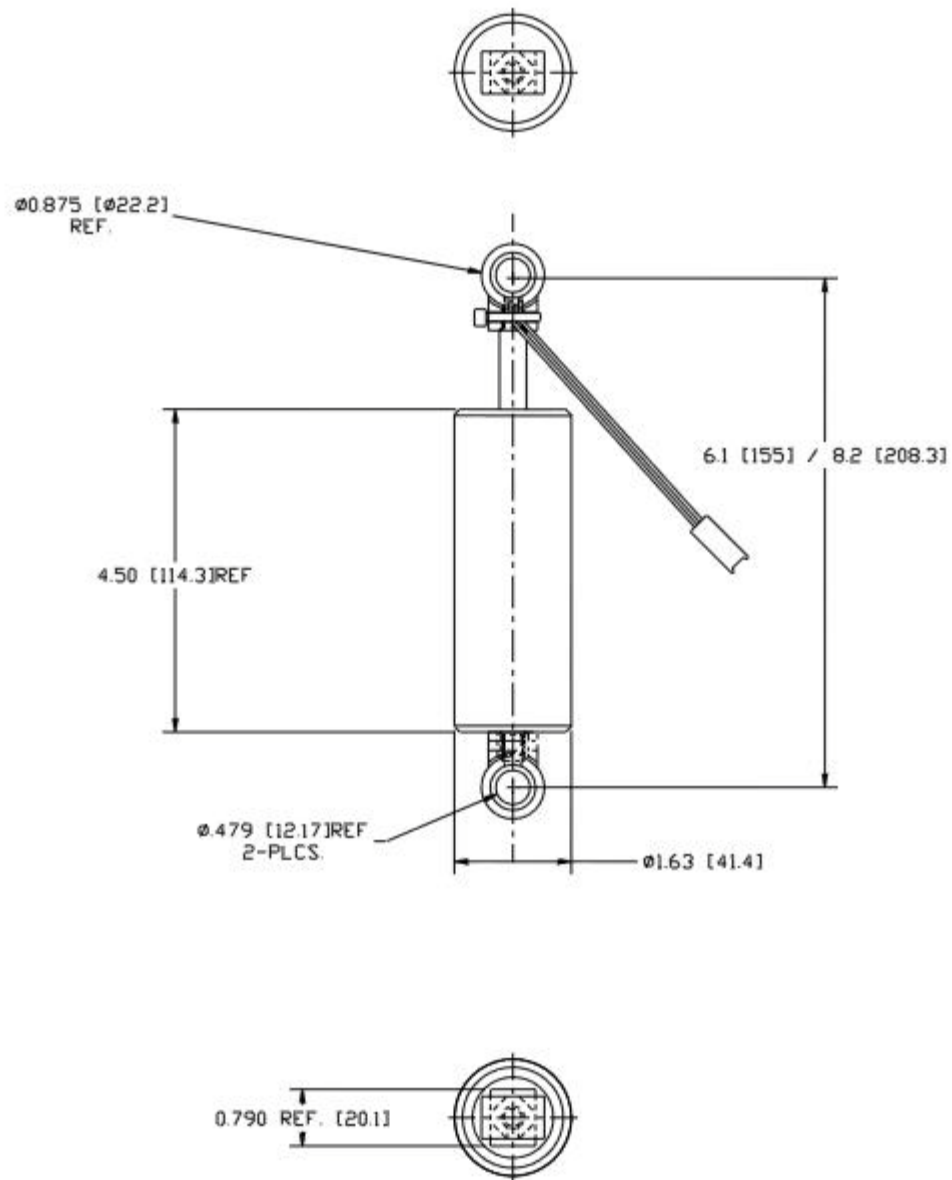


Figura A.2. Medidas del amortiguador magneto-reológico

A.3 ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS DE NATIONAL INSTRUMENTS

Las especificaciones que se detallan a continuación son las correspondientes a los equipos adquiridos de National Instruments. Como ya se comentó en este proyecto, el equipo NI PXI 1031 DC consiste en un chasis portátil con cuatro ranuras. En cuanto a los módulos NI PXI 4472 B y NI PXI 6230, ya se comentó también que consisten en tarjetas de adquisición de señales.

A.3.1 ESPECIFICACIONES DE NI PXI 1031DC

Electrical

AC Input

Input voltage range	100 to 120 VAC/200 to 240 VAC
Operating voltage range	90 to 132 VAC/180 to 264 VAC
Input frequency	50/60 Hz
Operating frequency range	47 to 63 Hz
Input current rating	4 to 2 A
Overcurrent protection	6.3 A fuse in power supply (no user-serviceable components inside)
Efficiency	65% minimum

DC Input

Input voltage range	11 to 30 VDC
Input current rating	30 A maximum
Efficiency	65% typical

DC Output

DC Current Capacity (I_{MH} , 0 to 50° C

Voltage (V)	Current (A)
+3.3	12
+5	17
+12	2
-12	0.8

Notes

¹For AC-powered applications and DC applications above 12.3 V input, the combined loading must not exceed 145.6 W.

²For AC/DC applications, the combined loading on the +5 and +3.3 VDC must not exceed 112 W.

³For DC-powered applications, at 11 VDC input the combined loading on +5, +3.3, +12, and -12 VDC must not exceed 137 W. At 12.3 VDC or higher input, the combined loading must not exceed 145.6 W.

⁴For DC applications, the output power is derated 5 W/°C above 45 °C.

⁵National Instruments does not guarantee measurement accuracy for brief periods when switching between AC and DC input.

Chassis Cooling

Per-slot cooling capacity	25 W
Fan	86 cfm

Acoustic Emissions

Sound pressure level (at operator's position)

(tested in accordance with ISO 7779)

Auto Fan (at 25 °C ambient)	45.5 dBA
High Fan	49.4 dBA

Sound Power

(tested in accordance with ISO 7779)

Auto Fan (at 25 °C ambient)	54.3 dBA
High Fan	58.2 dBA

Environmental

Operating location	Indoors
Altitude	2,000 m
Installation category	II
Pollution degree.....	2

Operating Environment

Operating temperature	0 to 50 °C (tested in accordance with IEC-60068-2-1 and IEC-60068-2-2)
Relative humidity.....	10 to 90% (tested in accordance with IEC-60068-2-56)

Storage Environment

Ambient temperature.....	-20 to 70 °C (tested in accordance with IEC-60068-2-1 and IEC-60068-2-2)
Relative humidity.....	5 to 95%, noncondensing (tested in accordance with IEC-60068-2-56)

Shock and Vibration

Operational shock.....	30 g peak, half-sine, 11 ms pulse (tested in accordance with IEC-60068-2-27; test profile developed in accordance with MIL-PRF-28800F)
Relative humidity.....	5 to 95%, noncondensing (tested in accordance with IEC-60068-2-56)

Random Vibration

Operating	5 to 500 Hz, 0.3 g _{rms}
Nonoperating	5 to 500 Hz, 2.4 g _{rms} (tested in accordance with IEC-60068-2-64; nonoperating profile exceeds the requirements of MIL-PRF-28800F, Class 3)

Mechanical

Overall dimensions (standard chassis)	
Height	177 mm (6.97 in.)
Width	257.1 mm (10.12 in.)
Depth.....	212.8 mm (8.38 in.)
Weight.....	5.0 kg (11.0 lb)

A.3.2 ESPECIFICACIONES DE NI PXI 4472B

Specifications

Typical for 25 °C unless otherwise noted.

Analog Input

Channel Characteristics

Number of channels

NI 4472 Series	8, simultaneously sampled
NI 4474 Series	4, simultaneously sampled

Input configuration Unbalanced differential

Resolution 24 bits, nominal

Type of ADC Delta-sigma

Oversampling, for sample rate (f_s):

1.0 kS/s $\leq f_s \leq 51.2$ kS/s 128 f_s

51.2 kS/s $< f_s \leq 102.4$ kS/s 64 f_s

Sample rates (f_s) 1.0 to 102.4 kS/s in 190.7 μ S/s increments for $f_s > 51.2$ kS/s or 95.36 μ S/s increments for $f_s \leq 51.2$ kS/s

Frequency accuracy ± 25 ppm

Input signal range ± 10 V peak

FIFO buffer size 1,024 samples

Data transfers DMA

Transfer Characteristics

Offset (residual DC) ± 3 mV, max

Gain (amplitude accuracy) ± 0.1 dB, max, $f_{in} = 1$ kHz

Amplifier Characteristics

Input impedance (ground referenced)

Positive input 1 M Ω in parallel with 60 pF

Negative input (shield) 50 Ω in parallel with 0.02 μ F

Flatness (relative to 1 kHz) ± 0.1 dB, DC to 0.4535 f_s , max, DC-coupled

-3 dB bandwidth 0.4863 f_s

Input coupling AC or DC, software-selectable

AC -3 dB cutoff frequency

NI 4472, NI 4474 3.4 Hz

NI 4472B 0.5 Hz

Overvoltage protection

Positive input ± 42.4 V

Positive inputs protected CH<0..7>

Negative input (shield) Not protected, rated at ± 2.5 V

Common-mode rejection ratio (CMRR)

$f_{in} < 1$ kHz > 60 dB, minimum

Dynamic Characteristics

Alias-free bandwidth (passband) DC (0 Hz) to 0.4535 f_s

Stop band 0.5465 f_s

Alias rejection 110 dB

Spurious-free dynamic range 130 dB, 1.0 kS/s $\leq f_s \leq 51.2$ kS/s

118 dB, 51.2 kS/s $< f_s \leq 102.4$ kS/s THD, $f_{in} = 1$ kHz

0 dBFS input < -90 dB

20 dBFS input < -100 dB

60 dBFS input < -60 dB

IMD < -100 dB (CCF 14 kHz + 15 kHz)

Crosstalk¹ (channel separation), $f_{in} = 0$ to 51.2 kHz

Between channels 0 and 1, 2 and 3, 4 and 5, or 6 and 7

Shorted input < -90 dB

1 k Ω load < -80 dB

Other channel combinations

Shorted input < -100 dB

1 k Ω load < -90 dB

Phase linearity $\leq \pm 0.5$ deg

Interchannel phase mismatch $< f_{in}$ (in kHz) $\times 0.018$ deg + 0.082 deg

Interchannel gain mismatch ± 0.1 dB

Filter delay through ADC 38.8 sample periods

Onboard Calibration Reference

DC level 5.000 V ± 2.5 mV

Temperature coefficient ± 5 ppm/ $^{\circ}$ C maximum

Long-term stability ± 20 ppm/ $\sqrt{1,000}$ h

Signal Conditioning

Constant current source (software-controlled)

Current 4 mA, $\pm 5\%$

Compliance 24 V

Output impedance > 250 k Ω at 1 kHz

Current noise < 500 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$

Triggers

Analog Trigger

Source CH<0..7>

Level -10 to +10 V, full scale, programmable

Slope Positive or negative (software-selectable)

Resolution 24 bits, nominal

Hysteresis Programmable

Digital Trigger

Compatibility 5 V TTL/CMOS

Response Rising or falling edge

Pulse width 10 ns, minimum

Bus Interface

Type Master, slave

Power Requirements

+3.3 VDC

PXI 400 mA, maximum

+5 VDC

PCI 2.6 A, maximum

PXI 2.2 A, maximum

+12 VDC 120 mA, maximum

-12 VDC 120 mA, maximum

A.3.3 ESPECIFICACIONES DE NI PXI 6230

Specifications listed below are typical at 25 °C unless otherwise noted.

Analog Input	
Number of channels	4 differential or 8 single ended
Channel type	Voltage input
ADC resolution	16 bits
DNL	No missing codes guaranteed
INL	Refer to the AI Absolute Accuracy Table
Sampling rate	
Maximum	250 KS/s
Minimum	0 S/s
Timing accuracy	50 ppm of sample rate
Timing resolution	50 ns
Input coupling	DC
Input range	$\pm 10\text{ V}$, $\pm 5\text{ V}$, $\pm 1\text{ V}$, $\pm 0.2\text{ V}$
Maximum working voltage for analog inputs	Refer to the Maximum Working Voltage section
CMRR (DC to 60 Hz)	95 dB (with respect to AI GND)
Input impedance	
Device on	
AI+ to AI GND	$>10\text{ G}\Omega$ in parallel with 100 pF
AI- to AI GND	$>10\text{ G}\Omega$ in parallel with 100 pF
Device off	
AI+ to AI GND	820 Ω
AI- to AI GND	820 Ω
Input bias current	$\pm 100\text{ pA}$
Crosstalk (at 100 kHz)	
Adjacent channels	-75 dB
Non-adjacent channels	-90 dB
Small signal bandwidth (-3 dB)	700 kHz
Input FIFO size	4,095 samples
Scan list memory	4,095 entries
Data transfers	DMA (scatter-gather), interrupts, programmed I/O
Overvoltage protection (AI $<0..7>$ with respect to AI GND)	
Device on	$\pm 25\text{ V}$ for up to two AI pins
Device off	$\pm 15\text{ V}$ for up to two AI pins
Input current during overvoltage condition	$\pm 20\text{ mA}$ max/AI pin
Settling Time for Multichannel Measurements	
Accuracy, full scale step, all ranges	
$\pm 90\text{ ppm}$ of step ($\pm 6\text{ LSB}$)	4 μs convert interval
$\pm 30\text{ ppm}$ of step ($\pm 2\text{ LSB}$)	5 μs convert interval
$\pm 15\text{ ppm}$ of step ($\pm 1\text{ LSB}$)	7 μs convert interval

ANEXO B

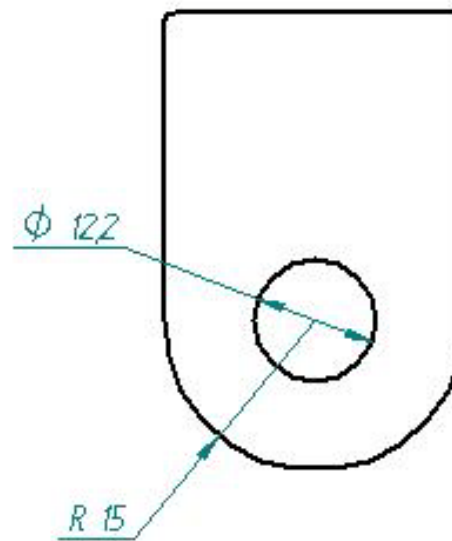
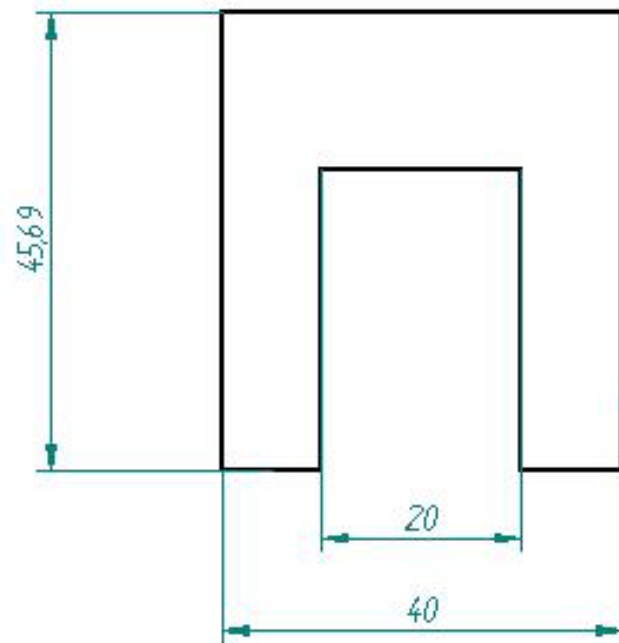
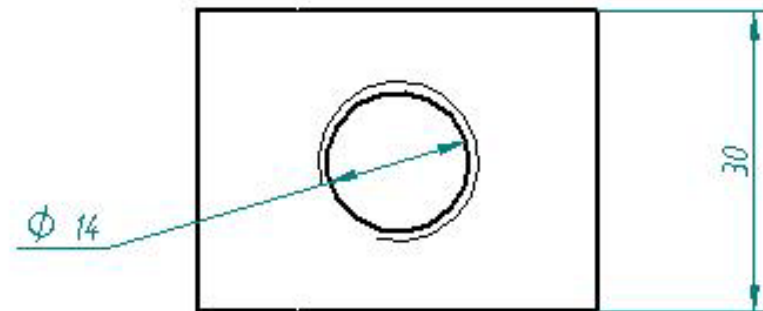
PLANOS DE PIEZAS DISEÑADAS

B.1 INTRODUCCIÓN

A continuación se adjuntan los planos de las piezas que han tenido que ser fabricadas para la adaptación del amortiguador magneto-reológico. Las piezas adjuntas son el soporte superior, el bulón para la unión del amortiguador con el propio soporte y el macho roscado. Como ya se comentó en el capítulo 4, donde se explica el proceso de adaptación necesario para la realización de dicho proyecto, dichas piezas corresponden al dispositivo superior fabricado para salvar las dificultades que ofrecía el amortiguador magneto-reológico debido a su reducido tamaño.

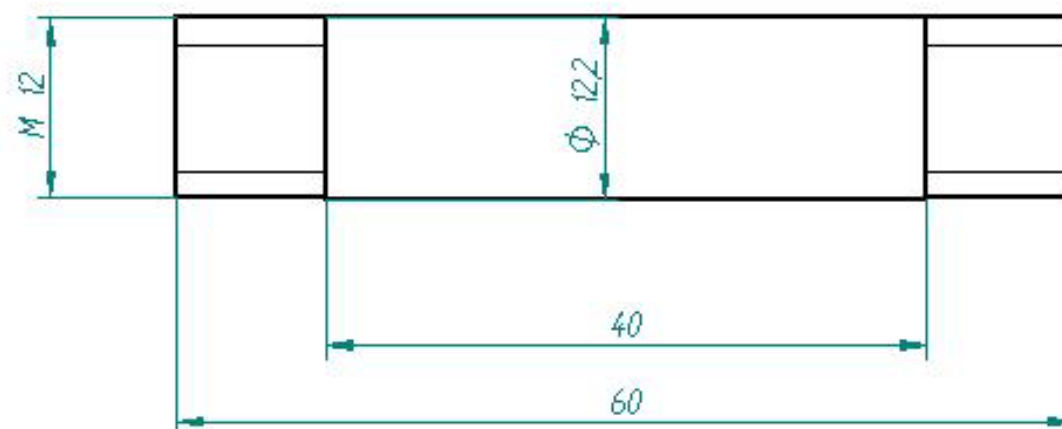
El último plano adjunto corresponde al casquillo diseñado y fabricado para evitar las holguras entre la carcasa del amortiguador deportivo adaptado y el propio amortiguador magneto-reológico.

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

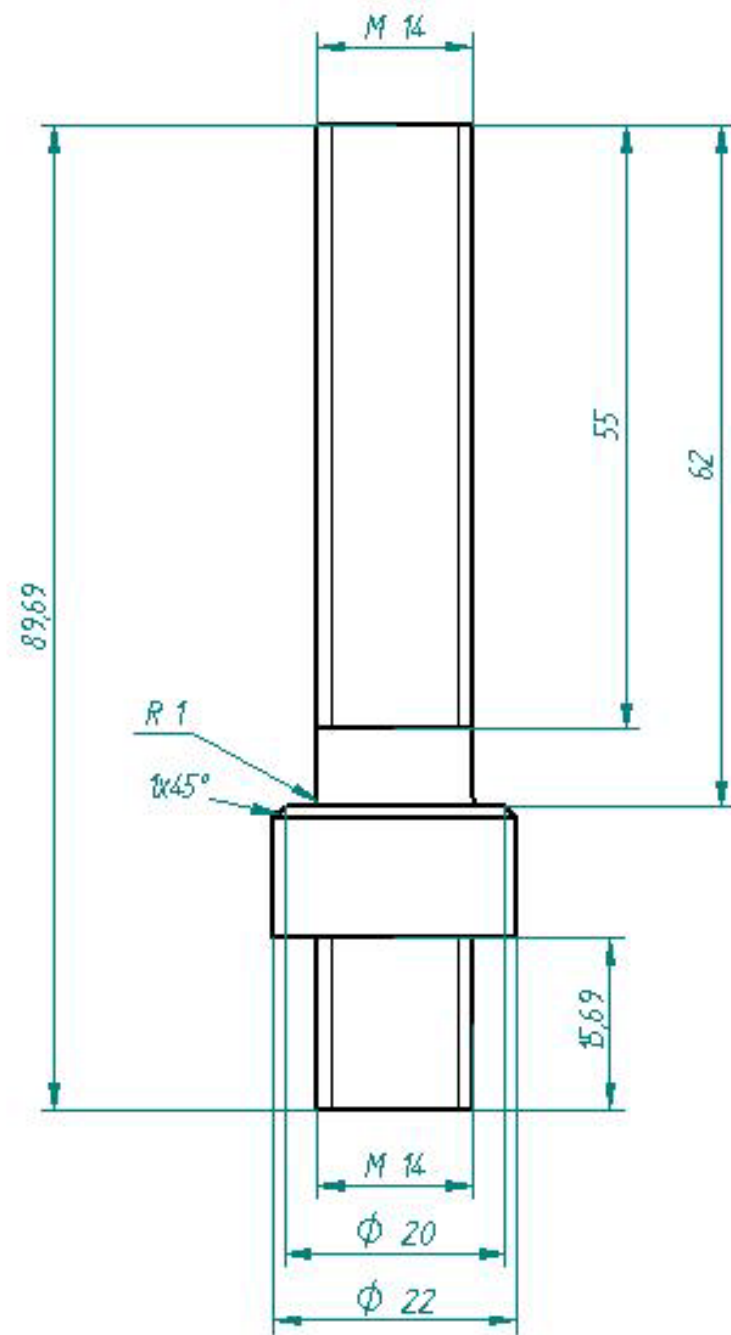


	Nombre	Fecha	SOLID EDGE EDS-PLM SOLUTIONS	
Dibujado				
Comprobado			Título Soporte	
Aprobado 1				
Aprobado 2			A3 Placa Rev	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0.5 y ±1°				
			Archivo: Soporte.dft	
			Escala	Peso Hoja 1 de 1

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



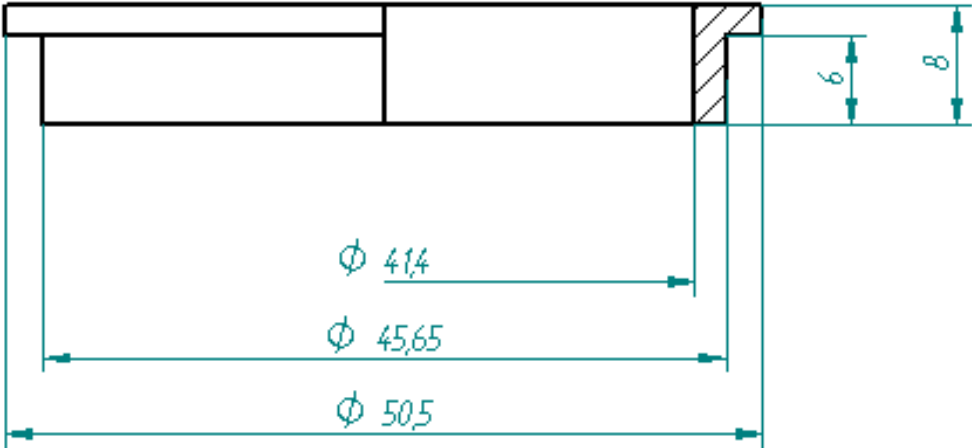
	Nombre	Fecha	SOLID EDGE EDS-PLM SOLUTIONS	
Dibujado	Diego	16/07/10		
Comprobado			Título Botón Superior	
Aprobado 1				
Aprobado 2			A3 Plana	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y ± 1				
			Archivo: Botón.dwg	
			Escala	Peso
			Hoja 1 de 1	



Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

	Nombre	Fecha	SOLID EDGE EDS-PLM SOLUTIONS	
Dibujado				
Comprobado			Título Macho Roscado	
Aprobado 1				
Aprobado 2			A4 Plano Rev	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ± 0.5 y $\pm 1^\circ$			Escola	Peso

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



	Nombre	Fecha	<div>SOLID EDGE</div> <div>EDS-PLM SOLUTIONS</div>	
Dibujado		16/07/10		
Comprobado				
Aprobado 1				
Aprobado 2			<div>Título</div> <div>Casquillo</div>	
<div>Salvo indicación contraria</div> <div>cotas en milímetros</div> <div>ángulos en grados</div> <div>tolerancias ±0,5 y ±1º</div>			A3	<div>Plano</div> <div>Rev</div>
			<div>Archivo: Casquillo.dwg</div>	
			<div>Escala</div> <div>Peso</div>	<div>Hoja 1 de 1</div>

REFERENCIAS

- [1] FERNÁNDEZ CASAS, Raúl. “Modelado de un sistema de suspensión de un vehículo automóvil mediante Simmechanics”. Directora: M^a Jesús López Boada. Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Mecánica. 2008.
- [2] Aparicio Izquierdo, F., Vera Álvarez, C., Díaz López, V. “Teoría de los vehículos automóviles”. Sección de Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid. 1995.
- [3] Información general de la suspensión. 2010.
http://www.mecanicavirtual.org/indice_cursos.html#suspension
- [4] SÁNCHEZ CASTILLO, Noemí. “Control de un sistema de suspensión semiactiva basado en lógica difusa: modelo de vehículo completo”. Directora: M^a Jesús López Boada. Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Mecánica. 2006.
- [5] Sistemas de suspensión. Elementos del automóvil. Cesmivap. 2010.

[http://www.mapfre.com/ccm/content/documentos/cesvimap/ficheros/CFElemA
moviblesExtracto.pdf](http://www.mapfre.com/ccm/content/documentos/cesvimap/ficheros/CFElemA
moviblesExtracto.pdf)

- [6] Tipos de suspensiones. 2010.
<http://www.automovilistas-chile.cl/forum/topic.asp>
- [7] J. Alberdi. *Manuales de automoción*. Universidad de Navarra. Enero de 2003.
<http://www.tecnun.es/automoción/>
- [8] CHACÓN HERNANDO, Víctor. “Diseño de una suspensión para un vehículo automóvil basada en amortiguadores magneto-reológicos”. Directora: M^a Jesús López Boada. Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Mecánica. 2010.
- [9] PICHARDO, Juan Manuel. Tipos de suspensión independiente. 2010.
<http://www.km77.com/tecnica/bastidor/clasificacion-suspension/t01.asp>.
- [10] CUPICH RODRIGUEZ, M. y ELIZONDO GARZA, F. J. *Amortiguadores magnetoreológicos*. V Congreso Mexicano de Acústica. 1998.
- [11] Prof. Dr. BREGNI, CARLOS. *Reología*. Departamento de Tecnología Farmacéutica, Facultad de Farmacia y Bioquímica. Universidad de Buenos Aires. 2010.
- [12] Instituto Tecnológico Superior de Calkini. *Anexo I: Introducción a la Reología*. 2010.
- [13] MATELLANES, Lina, CUEVAS, J. M^a, CLEMENTE, Raquel y ALLUÉ, Sandra. *Materiales y estructuras "inteligentes"*. Centro Tecnológico Gaike. 2003.
<http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/Articulo.asp?A=2971>
- [14] ÁLVAREZ ESTEBAN, Carlos. “Estudio y modelado de una amortiguador magneto-reológico mediante aprendizaje incremental” Directores: M^a Jesús López Boada, José Antonio Calvo Ramos. Universidad Carlos III de Madrid. 2007.

- [15] LÓPEZ GARCÍA, Oscar, CARNICERO LÓPEZ, Alberto, RUIZ PABLOS, Rosa. *Materiales inteligentes I/II. 1ª parte: Introducción a los materiales del siglo XXI. Anales de mecánica y electricidad*. 2004.
- [16] DOMÍNGUEZ-GARCÍA, P, Pastor, J. M, MELLE, Sonia y. RUBIO, M. A. *Microestructura de una suspensión magneto-reológica depositada*. Laboratorio de Sistemas Complejos. Dpto. Física Fundamental. Facultad de Ciencias UNED.
- [17] Autocity.com *MagneRide* de Delphi. 2009. Enlace web:
<http://www.autocity.com/documentos-tecnicos/index.html?cat=3&codigoDoc=210>
- [18] IGLESIAS, Guillermo. *Estabilidad de suspensiones magnéticas concentradas*. Grupo de Física de Interfases y Sistemas Coloidales, Dpto. de Física Aplicada. Universidad de Granada. 2010.
- [19] LÓPEZ GARCÍA, Oscar, CARNICERO LÓPEZ, Alberto, RUIZ PABLOS, Rosa. *Materiales inteligentes (II): Aplicaciones tecnológicas anales de mecánica y electricidad*. 2004.
- [20] B. SAPIŃSKI y S. BYDOŃ. *Application of magnetorheological fluid brake to shaft position control in induction motor*. Department of Process Control AGH – University of Science and Technology al. Mickiewicza 30, 30-059 Cracow, Poland.
- [21] Web oficial de Lord. 2010. Enlace web:
www.lord.com
- [22] Fundación de EROSKI, versión *online* de la revista CONSUMER EROSKI. Tipos de amortiguador. Fecha de publicación 18 de diciembre de 2006. Enlace web:
http://www.consumer.es/web/es/motor/mantenimiento_automovil/2006/12/18/158250.php
- [23] Información sobre amortiguadores BILSTEIN. *Applied Measurments LTD. Transducer Specialists*. 2010. Enlace web:

<http://www.appmeas.co.uk/aml-ie-industrial-lvdt-displacement-sensor.html>

- [24] Información sobre amortiguadores BILSTEIN. 2010. Enlace web:

www.bilstein.nl

- [25] Información sobre BILSTEIN *sprint* B8. Auto Rally, S. A. 2010. Enlace web:

<http://www.autorallye.com/cast/bilstein.htm>

- [26] MENESES ALONSO, Jesús, ÁLVAREZ CALDAS, Carolina y RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, Santiago. *Introducción al Solid Edge*. Ed. Thonson Editores Spain Paraninfo, S.A. 2006.

- [27] ROJAS LAZO, Oswaldo y, ROJAS ROJAS Luis. Revista DISEÑO Y TECNOLOGÍA, Artículo: Diseño asistido por computador. Junio de 2006. Enlace web:

http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/indata/vol9_n1/a02.pdf

- [28] Torres, J.C. *Diseño asistido por ordenador (Asignatura de 4ª Curso Ingeniería Informática)*. Dpto. Lenguajes y Sistemas Informáticos. ETS. Ingeniería Informática. Universidad de Granada. 2009. Enlace web:

http://www.itpuebla.edu.mx/Alumnos/Cursos_Tutoriales/Ana_Sosa_Pintle/SISTEMAS/ARCHIVOS_FUNDAMENTOS/ARCHIVOS/SISTEMASCAD.pdf

- [29] Instalación completa del amortiguador delantero de un vehículo automóvil. 2010. Enlace web:

<http://www.bmwfaq.com/f150/instalacion-completa-amortiguadores-en-un-e46-470264/>

- [30] Página Web Oficial National Instruments. 2010. Enlace web:

<http://www.ni.com>

- [31] Tutorial de LabVIEW SignalExpress 2009 facilitado por National Instruments.
2010. Enlace web:

<http://www.ni.com/swf/demos/us/sigx/gslv/>